1937

К. И. Шенфер - ДИНАМОМАШИНЫ И ДВИГАТЕЛИ ПОСТОЯННОГО ТОКА



Академик К. И. ШЕНФЕР

ДИНАМОМАШИНЫ И ДВИГАТЕЛИ ПОСТОЯННОГО ТОКА

ОНТИ • НКТП • СССР • 1937

Академик К. И. ШЕНФЕР

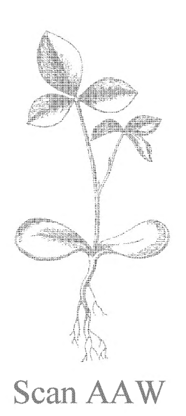
ПРОФЕССОР МОСКОВСКОГО ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО ИНСТИТУТА им. МОЛОТОВА

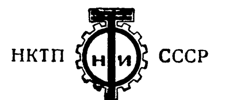
ДИНАМОМАШИНЫ И ДВИГАТЕЛИ ПОСТОЯННОГО ТОКА

ИЗДАНИЕ ПЯТОЕ ДОПОЛНЕННОЕ

Утверждено ГУУЗ НКТП
в качестве учебника
для энергетических втузов

Цена 7 руб., пер. 1 р. 75 к.





ОБЪЕДИНЕННОЕ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКОЕ ИЗДАТЕЛЬСТВО
ГЛАВНАЯ РЕДАКЦИЯ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ ЛИТЕРАТУРЫ
МОСКВА 1937 ЛЕНИНГРАД

Индекс ЭЭ — 20-5-2

Пр. ТКК № 110 от 9/VIII-37 г.

ПРЕДИСЛОВИЕ К ТРЕТЬЕМУ ИЗДАНИЮ

Третье издание настоящего труда отличается от предыдущих порядком изложения материала: обе части здесь печатаются не в двух книгах, как раньше, а в одном томе.

В новом издании дополнен ряд глав, касающихся работ автора в области коммутации, а также касающихся некоторых вопросов параллельной работы машины, рекуперации электрической энергии при электротяге, и введены новые главы, касающиеся машин постоянного тока высокого напряжения.

Автор

ПРЕДИСЛОВИЕ К ЧЕТВЕРТОМУ ИЗДАНИЮ

Новое издание дополнено рядом глав в части, касающейся обмоток коммутации, работы щеток на коллекторе и высоковольтных машин.

Во многих местах текст заново переделан и внесены поясняющие дополнения.

Чтение корректур проведено инж. А. В. Константиновым, которому автор выражает искреннюю благодарность.

1934 г. *Автор*

ПРЕДИСЛОВИЕ К ПЯТОМУ ИЗДАНИЮ

В новом издании переработаны главы о коммутации, дан расчет дополнительных полюсов при ускоренной коммутации по методу „подпитки“, добавлена глава о затруднениях коммутации в высоковольтных машинах и сделан ряд других дополнений в тексте.

Чтение корректур проведено инж. А. В. Константиновым, которому автор выражает искреннюю благодарность.

1937 г. *Автор*

ОГЛАВЛЕНИЕ

ГЛАВА ПЯТАЯ

Коммутация

ГЛАВА ШЕСТАЯ

Способы улучшения коммутации

ГЛАВА СЕДЬМАЯ

Экспериментальное исследование коммутации

Стр.

ГЛАВА ВОСЬМАЯ

Опыты автора

ГЛАВА ДЕВЯТАЯ

Коллектор и щетки

ГЛАВА ДЕСЯТАЯ

Возбуждение

ГЛАВА ОДИННАДЦАТАЯ

Характеристики генератора постоянного тока

ГЛАВА ДВЕНАДЦАТАЯ

Параллельная работа генераторов постоянного тока

ГЛАВА ТРИНАДЦАТАЯ

Параллельная работа машин большой мощности

Стр.

ГЛАВА ЧЕТЫРНАДЦАТАЯ

Буферные машины

ГЛАВА ПЯТНАДЦАТАЯ

Машины для питания трехпроводных сетей

ГЛАВА ШЕСТНАДЦАТАЯ

Машины со специальными характеристиками

ГЛАВА СЕМНАДЦАТАЯ

Высоковольтные машины постоянного тока

Стр.

ГЛАВА ДВАДЦАТЬ ВТОРАЯ

Другие методы пуска в ход и регулирования скорости двигателей

ГЛАВА ДВАДЦАТЬ ТРЕТЬЯ

Рекуперация электрической энергии при тяге на постоянном токе

ГЛАВА ДВАДЦАТЬ ЧЕТВЕРТАЯ

Потери в электрических машинах

Стр.

ГЛАВА ДВАДЦАТЬ ПЯТАЯ

Нагревание машин

ГЛАВА ДВАДЦАТЬ ШЕСТАЯ

Вентиляция

ГЛАВА ДВАДЦАТЬ СЕДЬМАЯ

Конструкция электрических машин постоянного тока

ГЛАВА ДВАДЦАТЬ ВОСЬМАЯ

О расчете электрических машин

Стр.

ГЛАВА ДВАДЦАТЬ ДЕВЯТАЯ

Расчет якоря и коллектора

ГЛАВА ТРИДЦАТАЯ

Выяснение размеров зубцов и сердечника якоря

ГЛАВА ТРИДЦАТЬ ПЕРВАЯ

Полюса и сердечники

ГЛАВА ТРИДЦАТЬ ВТОРАЯ

Расчет дополнительных полюсов

ГЛАВА ТРИДЦАТЬ ТРЕТЬЯ

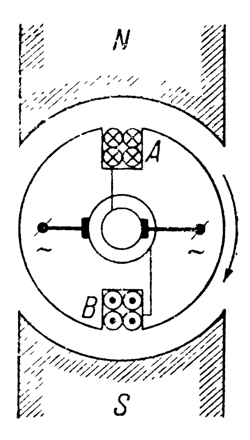
Пример расчета генератора шунтового возбуждения

I. Якорь

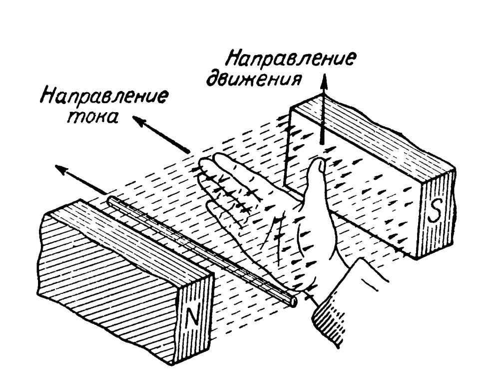
КРАТКИЙ ИСТОРИЧЕСКИЙ ОБЗОР

Первые электрические генераторы, появившиеся вскоре после открытия Фарадеем (1831 г.) закона электромагнитной индукции, были машинами переменного тока.

На фиг. 1 показан схематический чертеж генератора переменного тока старинной, теперь уже оставленной конструкции Вернера Сименса (1856 г.); якорная обмотка этого примитивного генератора, как видно из фиг. 1, состоит всего из одной катушки, заложенной в два паза железного барабана, вращающегося между полюсами N и S стального постоянного магнита; концы якорной обмотки присоединены к двум собирательным (контактным) кольцам.



Фиг. 1. Генератор переменного тока Вернера Сименса (1856 г.).



Фиг. 2. „Правило правой руки".

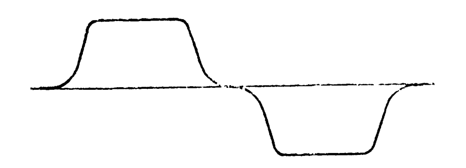
При вращении такого якоря провода его обмотки будут пересекать силовые линии магнитного поля, образованного полюсами, вследствие чего в этих проводах появятся электродвижущие силы (сокращенно э. д. с.).

Для того чтобы узнать направление этих индуктированных э. д. с., можно пользоваться известным „правилом правой руки".

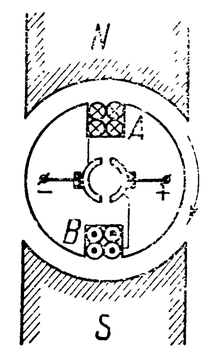
Это правило заключается, как известно, в следующем: для определения направления индуктированной э. д. с. необходимо расположить правую руку так, чтобы воображаемые силовые магнитные линии магнитного поля, в котором перемещается

проводник, своими остриями вонзились в ладонь и большой палец указал направление перемещения проводника; тогда четыре вытянутых пальца нам укажут направление индуктированной э. д. с. (фиг. 2).

Применяя правило правой руки по отношению к проводникам, лежащим в пазу *А* на фиг. 1, мы видим, что в этих проводниках при вращении якоря по часовой стрелке будут наводиться э. д. с., направленные от зрителя к плоскости чертежа



Фиг. 3. Кривая тока генератора согласно фиг. 1.

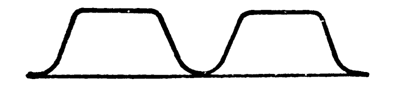


Фиг. 4. Генератор постоянного тока с примитивным коллектором.

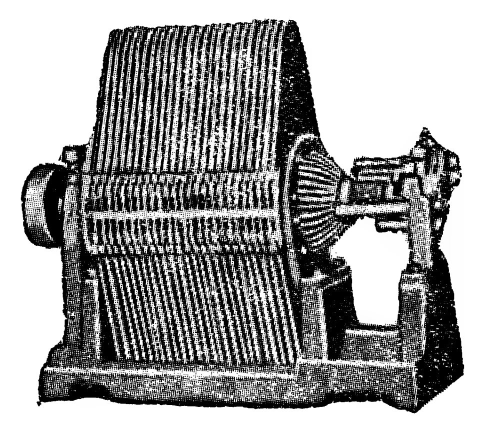
(это направление на фиг. 1 условно обозначено крестами); в проводах паза *В* появятся при этих же условиях э. д. с., направленные из-за плоскости чертежа к зрителю (это направление на фиг. 1 обозначено точками).

Соединив щетки генератора, изображенного на фиг. 1, с какой-нибудь внешней цепью и заставив вращаться якорь, мы получим во внешней цепи ток.

Так как при вращении якоря каждый паз якоря попеременно будет перемещаться то под северным *N*, то под



Фиг. 5. Кривая тока генератора согласно фиг. 4.

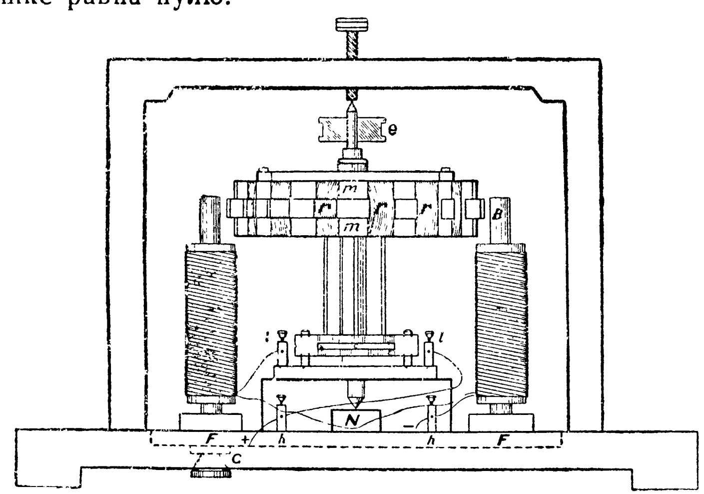


Фиг. 6. Генератор постоянного тока с примитивным коллектором согласно фиг. 4 (1856 г.).

южным *S* полюсом магнита, то ясно, что ток этого генератора будет переменным; примерная кривая этого тока изображена на фиг. 3.

Для получения динамомашины постоянного тока мы должны изменить конструкцию машины, изображенной на фиг. 1, заменив два контактных кольца к о л л е к т о р о м.

На фиг. 4 изображена такая динамомашина постоянного тока с примитивным коллектором, состоящим из двух изолированных друг от друга половинок медного цилиндра, к которым присоединены концы якорной обмотки. Из этой фигуры видно, что при вращении якоря каждая из щеток попеременно будет соединяться то с одним, то с другим концом якорной обмотки; щетки на коллекторе при этом должны быть так расположены, чтобы эта перемена соединений концов якорной катушки со щеткой происходила в тот момент, когда индуктированная э. д. с. в катушке равна нулю.



Фиг. 7. Электродвигатель Пачинотти (1860 г.).

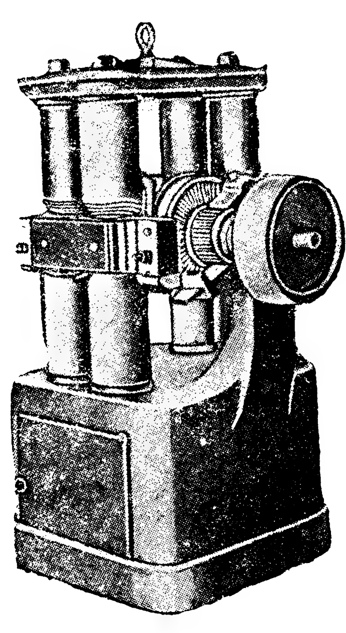
Таким образом при вращении якоря машины, снабженной коллектором, во внешней цепи потечет выпрямленный ток; примерный характер кривой этого тока показан на фиг. 5[1]. Такой выпрямленный ток еще, конечно, не может быть назван постоянным; для получения действительно постоянного тока машина, изображенная на фиг. 4, нуждается в дальнейшем усовершенствовании.

Это усовершенствование заключается в увеличении числа коллекторных пластин и числа катушек (или, как говорят, секций), из которых образуется якорная обмотка. Впервые такой якорь с большим числом коллекторных пластин построил Пачинотти в 1860 г.; десять лет спустя такой же якорь независимо от Пачинотти был изобретен Граммом.

Пачинотти и Грамм обматывали полый железный цилиндр спиральной замкнутой на себя обмоткой, как показано на фиг. 9; на этой фигуре показаны 8 последовательно соединенных кату-

[1] Электрические машины, имеющие якорь согласно фиг. 4 и являющ еся прототипом современных электрических машин постоянного тока, строились в прежнее время в большом относительно количестве, главным образом, для телеграфных и железнодорожных сигнализационных установок. На фиг. 6 показана такая машина постройки 1856 г.

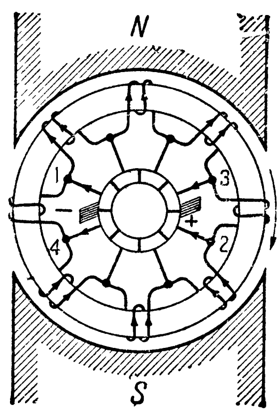
шек (или, как говорят, секций), образующих собой обмотку якоря, и столько же изолированных друг от друга коллекторных пластин, образующих собою коллектор.



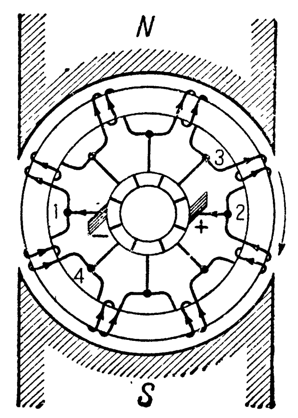
Фиг. 8. Динамомашина Грамма.

Обозначив на фиг. 9 направления индуктированных э. д. с., мы увидим, что результирующая э. д. с. верхней половины обмотки направлена противоположно результирующей э. д. с. нижней половины; в точках *1* и *2* эти э. д. с. как бы встречаются друг с другом; таким образом если щетки + и — соединить с каким-нибудь внешним сопротивлением, то через это сопротивление потечет ток, который внутри якорной обмотки в точках *1* и *2* будет разветвляться на две приблизительно равные части (отсюда видно, что двухполюсная граммовская обмотка имеет две параллельные ветви). Если якорь вращается вхолостую, т. е. когда щетки не соединены между собой через внешнее сопротивление, внутри замкнутой граммовской обмотки не возникает никакого тока, так как сумма э. д. с. всех витков внутренней цепи вследствие симметрии обмотки равна нулю.

При вращении этого якоря (фиг. 9) каждая из секций поочередно выключается из одной параллельной ветви и включается в другую, причем число секций, одновременно соединенных последова-



Фиг. 9. Якорь Грамма.

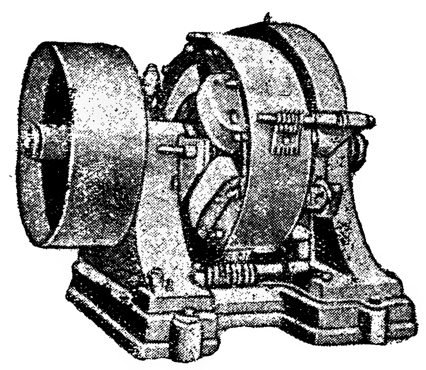


Фиг. 10. Якорь Грамма.

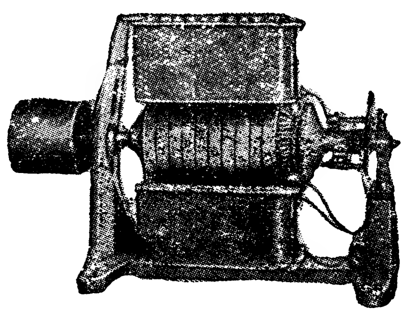
тельно, все время колеблется между тремя и четырьмя; действительно, при положении коллектора относительно щеток, изображенном на фиг. 10, в каждой ветви имеется по четыре по-

следовательно соединенных секции; при повороте якоря на половину коллекторного деления[1], как показывает фиг. 9, каждая из щеток одновременно примыкает к двум коллекторным пластинам; тогда, следовательно, обе катушки, расположенные в нейтральной зоне, выключаются из цепи, так как каждая катушка замыкается щеткой на короткое; таким образом оказывается, что при положении якоря, изображенном на фиг. 9, в каждой из параллельных ветвей оказываются последовательно соединенными три катушки.

Такое периодическое колебание числа секций, включенных в параллельную ветвь обмотки, вызывает колебание разности потенциалов между щетками машины. При увеличении числа коллекторных пластин это колебание уменьшается, и при 20—30 коллекторных пластинах на пару полюсов оно делается практически незаметным.



Фиг. 11. Динамомашина Грамма с внутренними полюсами.



Фиг. 12. Динамомашина Гефнер-Альтнека (1872 г.).

На фиг. 9 был показан якорь Грамма, состоящий из обмотки и коллектора. В прежнее время был сделан ряд попыток соединения обмотки якоря и коллектора в одно целое.

На фиг. 11 показана машина, в которой осуществлена эта идея. Как видно из этой фигуры, неподвижные полюса расположены внутри вращающегося якоря; части витков этого якоря, расположенные по внешней цилиндрической поверхности, выполнены в виде голых массивных медных стержней с изоляционными прослойками между смежными пластинами и являются коллекторными пластинами.

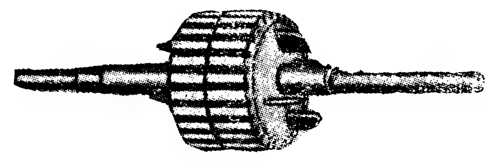
Большим недостатком кольцевых якорей Грамма является то, что обмотка этих якорей может быть намотана только вручную, что требует много времени при изготовлении якоря и тем удорожает машину; к этому недостатку еще присоединяются два других: скверные условия охлаждения якоря и тяжелые условия коммутации тока (см. ниже главу о коммутации); поэтому

---

[1] Коллекторным делением называется расстояние между краями двух смежных коллекторных пластин, измеренное по внешней периферии коллектора.

кольцевые якори в настоящее время уже больше не строятся[1].

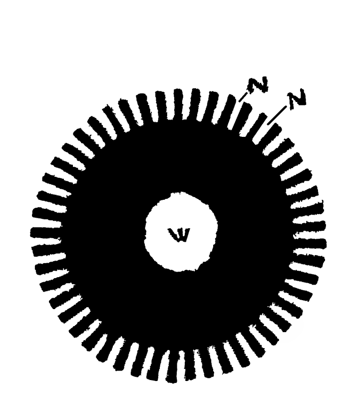
Указанных здесь недостатков удалось избежать Гефнер-Альтнеку (1872 г.) в его барабанном якоре (фиг. 12). В настоящее время барабанные якори завоевали себе исключительное право гражданства.

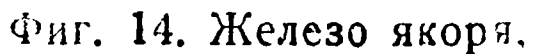


Фиг. 13. Якорь с пазами.

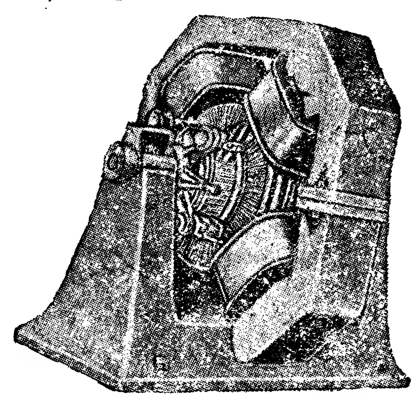
Для уменьшения величины воздушного зазора между полюсными наконечниками и якорем в настоящее время по предложению И. Венштрема (1882 г.) исключительно применяются якори с пазами, в которые закладывается якорная обмотка.

На фиг. 13 показан один из таких современных якорей без обмотки и коллектора; якорь набран из целого ряда железных листов (толщиной в 0,5—0,3 mm) с проштампованными пазами





Фиг. 14. Железо якоря.



Фиг. 15. Машина четырехполюсного типа Броуна (1887 г.).

и отверстием для вала; для уменьшения токов Фуко железные листы, образующие тело якоря, изолированы друг от друга тонкими бумажными прослойками толщиной примерно в 0,02—0,05 mm (фиг. 14).

---

[1] К крупным недостаткам граммовских якорей приходится отнести также неэкономичное использование меди обмотки.

Действительно, как известно, э. д. с. наводится только в той части провода, которая непосредственно перерезывается магнитными линиями.

Нетрудно видеть из фиг. 9, что не вся длина провода, составляющего виток, является активной, а только та часть его, которая расположена на внешней периферии якоря.

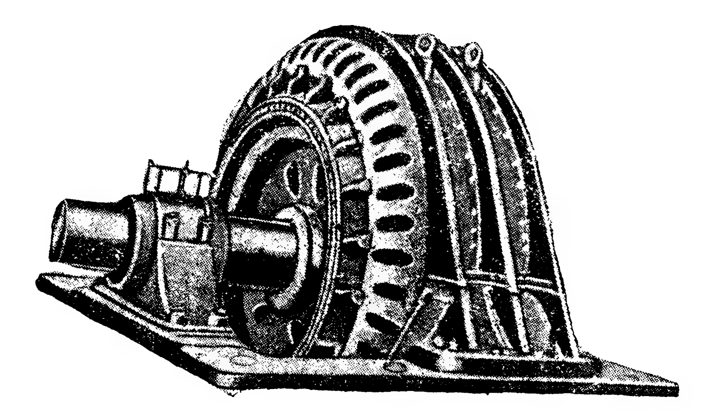
Что же касается до остальной части провода, составляющего виток, то она только служит электрическим соединением и способствует тому, чтобы э. д. с., наводимые в отдельных витках, суммировались. Ввиду того что активная сторона витка составляет лишь сравнительно незначительную долю всей его длины, ясно, что осуществление граммовской обмотки требует сравнительно большой затраты меди, что не только удорожает стоимость машины, но также увеличивает активное сопротивление якоря.

Конструкция электрических машин постоянного тока получила вполне законченную форму примерно к концу восьмидесятых годов прошлого столетия. Такая конструкция удержалась и до настоящего времени: это — машина с внешними полюсами и двухслойной барабанной обмоткой якоря.

К этому же примерно времени совершился переход от двухполюсного типа машин к многополюсному, характеризующемуся лучшим использованием материала и меньшим весом.

Одна из первых машин четырехполюсного типа была построена Броуном (C. F. L. Brown) в 1887 г. (фиг. 15).

В начале восьмидесятых годов прошлого столетия машины постоянного тока строились на небольшую сравнительно мощность (не выше примерно 100 *л. с.*). В наше время в технике



Фиг. 16. Двигатель для прокатного стана мощностью в 1 500 *л. с.*

динамостроения наблюдается заметная тенденция к увеличению мощности электрических машин. Теперь нередко можно встретить двигатели постоянного тока, мощность которых измеряется десятками тысяч лошадиных сил (например, для прокатных станов, фиг. 16).

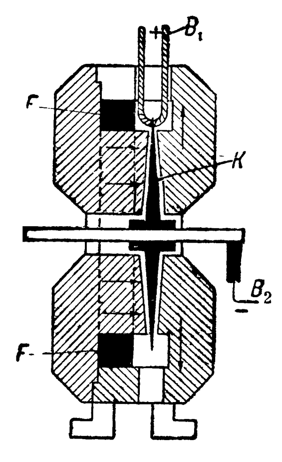
Постройка таких мощных машин стала возможной только после того, как были найдены способы улучшения коммутации.

Последнее было достигнуто, главным образом, путем замены медных щеток на коллекторе угольными, обладающими большим контактным сопротивлением, чем медные, и дающими поэтому лучшие условия коммутации, а также — введением дополнительных полюсов и в некоторых случаях, кроме того, введением компенсационных обмоток. Эти нововведения (угольные щетки, дополнительные полюса и компенсационные обмотки) позволили в весьма сильной степени повысить использование активного материала машины, т. е. меди и железа; так, например, в настоящее время встречаются электрические машины большой мощности, в которых линейная нагрузка якоря AS в моменты максимальных нагрузок на валу доходит до 500 и

даже до 900 A на 1 *пог. см*, что в десятки раз превосходит величину *AS*, допускавшуюся прежде.

В якорях, рассмотренных нами выше систем, проводники якорной обмотки при ее вращении перемещаются попеременно то под северным, то под южным полюсом; вследствие этого в отдельных проводах обмотки якоря индуктируются токи переменного направления, при помощи же коллектора происходит выпрямление этих токов во внешней цепи.

Можно избавиться от необходимости иметь коллектор, если заставить проводники якоря двигаться в равномерном поле одинакового направления; в этом случае при равномерном вращении якоря индуктированная э. д. с. в каждом проводнике будет постоянной по своей величине и направлению; машины, построенные на этом принципе, носят название униполярных машин, так как в них при вращении якоря проводники перемещаются все время под одним и тем же полюсом.



Фиг. 17. Униполярная машина.

На фиг. 17 видны основные черты такой машины.

В этой машине обмотка якоря состоит всего-навсего из одного провода; этим проводом является стальной диск *K*, приводимый во вращение от ременного шкива.

Снимание тока происходит при помощи двух щеток B_1 и B_2. Магнитное поле этой машины создается катушкой возбуждения *F*; направление силовых линий этого поля обозначено на чертеже стрелками; при вращении диска *K* в нем индуктируется э. д. с., вследствие чего между щетками B_1 и B_2 появляется некоторая разность потенциалов, величина которой зависит от скорости вращения диска и величины магнитной индукции в воздушном зазоре.

Практическое значение этой машины, однако, невелико благодаря малой э. д. с., которая может быть при этой конструкции индуктирована в якоре.

Целым рядом изобретателей было предложено большое число конструкций униполярной машины, при которых можно было достичь большой индуктированной э. д. с. в якоре, однако все эти попытки к благоприятным практическим результатам не привели[1].

---

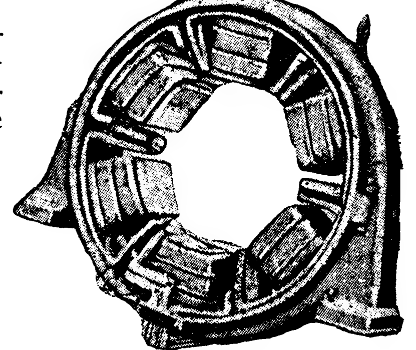
[1] Подробное описание униполярных машин разных конструкций см. Dr. Ing. B. I. Ugrimoff, Die Unipolarmaschine, Dissertation, 1911.

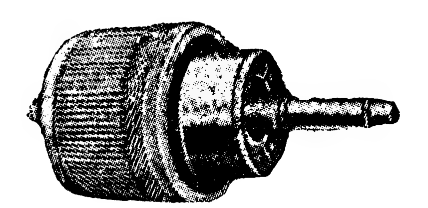
ГЛАВА ПЕРВАЯ

ЯКОРНЫЕ ОБМОТКИ

§ 1. Общие понятия. Современная электрическая машина постоянного тока состоит из следующих частей (фиг. 18): 1) якоря с обмоткой, 2) коллектора, 3) станины, 4) главных полюсов, 5) дополнительных полюсов.

Кроме перечисленных выше обмоток возбуждения, якоря и дополнительных полюсов машина постоянного тока имеет иногда еще





Фиг. 18. Части электрической машины постоянного тока.

компенсирующую обмотку, заложенную в пазы полюсных наконечников главных полюсов и служащую для компенсации поля реакции якоря (фиг. 87).

Основываясь на вышеизложенном перечне частей электрической машины, начнем ее изучение с якорных обмоток.

§ 2. Типы обмоток. Если индуктируемые проводники движутся в магнитном поле переменного направления, представляется возможным соединить эти проводники между собой таким образом, что индуктированные в этих проводниках э. д. с. будут складываться.

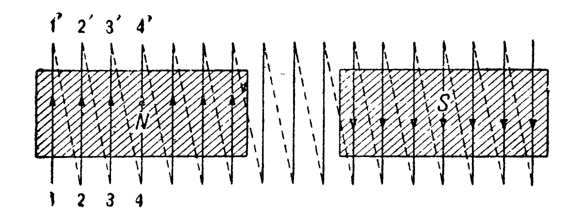
Для пояснения сказанного представим себе ряд магнитных полюсов чередующихся полярностей, расположенных друг относительно друга на равных расстояниях, как это показано на фиг. 19.

Соединение проводов между собой может быть произведено трояким образом.

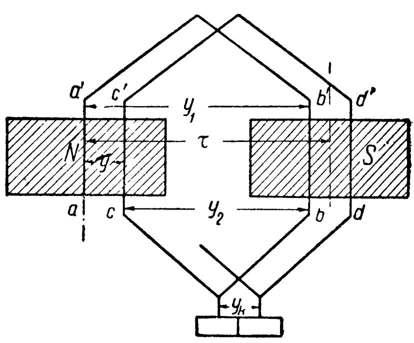
1. Конец первого стержня *1'* соединяется с началом второго *2*; конец второго *2'* соединяется с началом третьего *3*,

и т. д.; при этом получается так называемая кольцевая или граммовская обмотка (фиг. 19).

2. Можно соединять между собой проводники, лежащие и под разноименными полюсами N и S (фиг. 20), ввиду того, что направление индуктированных э. д. с. в проводах, лежащих под разноименными полюсами, разное, в этом случае соединение между проводами выполняется следующим образом: конец a' первого провода соединяется с концом b' провода, лежащего под другим полюсом S, а начало b последнего



Фиг. 19. Развернутая в плоскости схема граммовской обмотки.

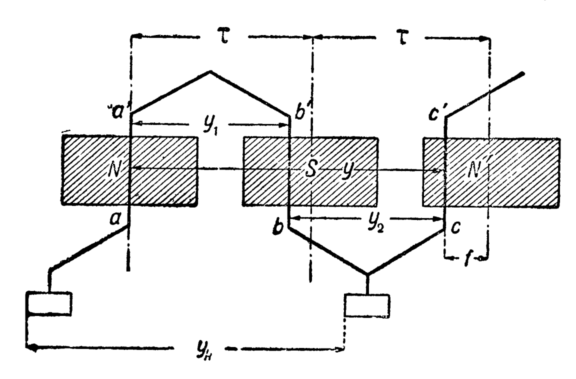


Фиг. 20. Петлевая обмотка.

провода соединяется с началом c провода, лежащего под северным полюсом N, и т. д.

Такая обмотка принадлежит к типу барабанных и носит название петлевой (или иногда — параллельной).

3. Третий способ соединения проводов между собой заключается в следующем: конец первого провода a', лежащего в данный момент, скажем, под северным полюсом N, соединяется с концом провода b', лежащего под южным полюсом S (фиг. 21); начало последнего провода b соединяется с началом провода c, лежащего не под полюсом N, как для петлевой обмотки, а под полюсом N', и т. д.; таким образом, обходя обмотку якоря, мы все время подвигаемся волнообразно вперед, а не вперед и потом назад, как это было в случае петлевой обмотки.



Фиг. 21. Волновая обмотка.

Такая обмотка называется **волновой**.

На фиг. 9 мы видели пример граммовской (или, как ее иногда еще называют, спиральной) обмотки; на фиг. 22 дана схема петлевой и ниже на фиг. 35 — схема волновой обмотки.

Все вышеуказанные системы обмоток относятся к типу так называемых замкнутых обмоток, т. е. каждая из этих обмоток представляет собой замкнутую на себя цепь.

Сравнивая фиг. 9 и 22, мы видим, что барабанные обмотки в отношении распределения тока ничем не отличаются от кольцевых.

Разница заключается лишь в том, что максимальный магнитный поток, проходящий сквозь один виток обмотки якоря, в случае кольцевой обмотки равен половине всего магнитного потока, выходящего из одного полюса, а в случае барабанной обмотки этот поток равен всему потоку одного полюса; иными словами, при барабанной обмотке индукции подвергаются обе стороны катушки, при кольцевой обмотке — только одна сторона.

Фиг. 22. Барабанная петлевая обмотка.

Поэтому, если обозначить через K — число катушек, или так называемых секций,[1] через S полное число индуктируемых сторон секций, то для кольцевого якоря мы будем иметь

$$S = K$$

и для барабанного

$$S = 2K.$$

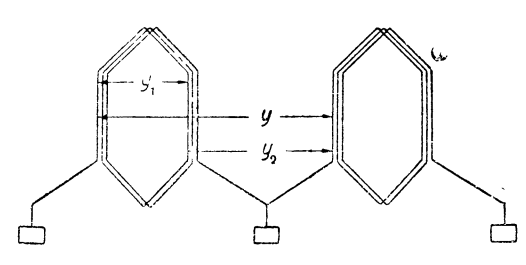
Число коллекторных пластин обыкновенно бывает равно числу секций K.

Число коллекторных пластин кольцевой обмотки будет

$$K = \frac{N}{w};$$

для барабанной обмотки будет

$$K = \frac{N}{2w}.$$



Фиг. 23. Секция волновой обмотки ($w = 3$).

Число витков w в одной секции может быть равно 1 или большему числу.

---

[1] Секцией обмотки называется та часть ее, которая лежит между двумя следующими друг за другом при обходе обмотки коллекторными пластинами.

Секция может состоять из одного или нескольких витков: так, например на фиг. 20 и 21 каждая секция содержит по одному витку; на фиг. 9 — по два витка, а на фиг. 23 — по три витка.

Что же касается до секционной или индуктируемой стороны обмотки, то под ней мы подразумеваем ту часть секции, которая принимает активное участие в процессе наведения э. д. с. Из предшествующего ясно, что каждая секционная сторона может заключать в себе один, два или больше активных проводов В стержневой обмотке каждая секция состоит из одного витка и каждая секционная сторона — из одного только активного провода.

Если через N обозначить число всех активных проводников обмотки якоря, то для кольцевой или барабанной обмоток мы будем иметь

$$S=\frac{N}{w}.$$

На фиг. 23 показана секция волновой обмотки с числом витков в одной секции $w=3$.

§ 3. Шаг обмотки. Из вышеизложенного видно, что при обходе всякой обмотки от секции к секции мы подвигаемся вперед или назад, минуя некоторое число проводников.

То число проводников обмотки (при $w=1$, или число секционных сторон при $w>1$), на которое мы перемещаемся по окружности якоря вперед или назад, обходя одну секцию, назовем результирующим шагом обмотки, в дальнейшем будем его обозначать через y.

Результирующий шаг барабанной обмотки составляется из двух частичных шагов y_1 и y_2.

Для петлевой обмотки мы имеем (фиг. 20)

$$y=y_1-y_2;$$

для волновой (фиг. 21)

$$y=y_1+y_2.$$

В дальнейшем второй частичный шаг y_2 мы будем относить к передним торцевым соединениям со стороны коллектора и первый частичный шаг y_1 — к торцевым соединениям с задней стороны якоря (фиг. 20 и 21).

Результирующий шаг y, как это ясно видно из фиг. 20 и 21, пропорционален тому числу коллекторных пластин, которые находятся между концами одной секции.

То число коллекторных пластин, на которое мы должны сместиться по коллектору при обходе одной секции, будем называть коллекторным шагом y_k (фиг. 20 и 21); так как в барабанной обмотке общее число коллекторных пластин в два раза меньше, чем общее число проводников якоря (или общее число секционных сторон при $w>1$), мы получаем при барабанной обмотке $y_k=\frac{y}{2}$, а в кольцевой $y_k=y$.

§ 4. Условия выполнимости барабанных замкнутых обмоток. Всякая барабанная замкнутая обмотка постоянного тока должна удовлетворять следующим трем требованиям:

1) всякая обмотка, замыкаясь на себя, должна содержать все активные провода обмотки;

2) каждый активный провод должен быть присоединен к обмотке один раз;

3) э. д. с., индуктированные в активных проводах каждой ветви, должны складываться друг с другом.

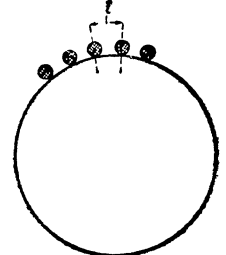
1-е требование. Обозначим через t проводниковое деление, т. е. расстояние по окружности якоря между двумя смеж-

ными проводниками (фиг. 24); число проводников (или число секционных сторон при $w > 1$) обозначим через S.

Длина всей окружности якоря в этом случае выразится как произведение $S \cdot t$.

Начнем мысленно обходить всю обмотку, начиная с какого-нибудь одного провода; сделав некоторое число результирующих шагов y, мы вернемся к тому же проводу, с которого начали свой обход; так как при совершении одного результирующего шага в барабанной обмотке обычно приходится обходить два провода (или две секционные стороны) (фиг. 20 и 21), то общее число результирующих шагов, которое мы должны совершить для того, чтобы обмотка замкнулась, будет равно $\frac{S}{2}$; отсюда следует, что $\frac{S}{2}$ должно быть целым числом, или, другими словами, S должно быть числом четным.

Ввиду того что обмотка при обходе $\frac{S}{2}$ результирующих шагов замыкается на себя, длина пути L, который мы совершим по окружности якоря, обходя всю его обмотку, должна быть равной $L = \frac{S}{2} y \cdot t$ и, кроме того, должна представлять собой кратное число окружности якоря $u \cdot S \cdot t$; таким образом мы имеем



Фиг. 24. Проводниковое деление.

$$L = \frac{S}{2} y \cdot t = u \times \text{окружность якоря} = u \cdot S \cdot t,$$

откуда

$$y = 2u,$$

т. е. для того чтобы обмотка замыкалась на себя, необходимо, чтобы результирующий шаг y был числом четным.

Если числа $\frac{S}{2}$ и $\frac{y}{2}$ имеют общего делителя, например, g, то после $\frac{S}{2g}$ результирующих шагов пройденный по окружности якоря путь будет

$$L' = \frac{S}{2g} \cdot y \cdot t;$$

так как согласно нашему предположению $\frac{y}{2g}$ равно целому числу n, то

$$L' = n \cdot S \cdot t = n \times \text{длина окружности}.$$

Это значит, что обмотка замыкается на себя после $\frac{S}{2g}$ результирующих шагов, а так как общее возможное число шагов равно $\frac{S}{2}$, то мы получаем g замкнутых обмоток.

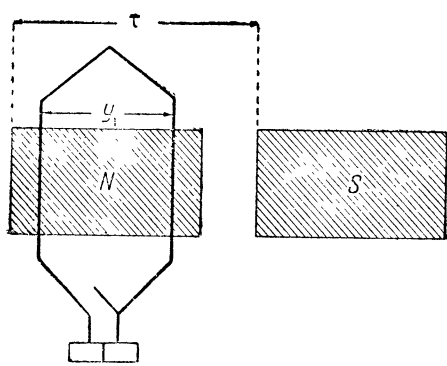
Таким образом мы приходим к следующему выводу: для того чтобы обмотка получилась однократно

замкнутой, необходимо, чтобы $\frac{S}{2}=K$ и $\frac{y}{2}=y_k$ не имели общего множителя.

2-е требование. Необходимо, чтобы барабанная обмотка заключала в себе все активные провода якоря; для того чтобы это было возможным, необходимо, чтобы при y четном оба частичных шага y_1 и y_2 были числами нечетными.

Действительно, допустив противное, мы увидим, что, начиная обход обмотки с какого-нибудь нечетного проводника, мы будем захватывать провода только с нечетными номерами, все же четные проводники останутся неприсоединенными.

Так, например, если $y_1=8$ и $y_2=6$, мы получим следующую петлевую обмотку, в которой окажутся включенными только проводники с нечетными номерами: *1—9—3—11—5—13* и т. д.



Фиг. 25. Секция петлевой обмотки с чрезмерно укороченным шагом.

3-е требование. Для того чтобы э. д. с., индуктированные в отдельных проводах параллельного разветвления обмотки якоря, складывались между собой, а не вычитались, необходимо, чтобы частичные шаги y_1 и y_2 барабанной обмотки были приблизительно равны полюсному делению τ (фиг. 20 и 21).

Сказанное поясняет фиг. 25, на которой изображена секция обмотки с частичными шагами y_1, значительно отличающимися от величины полюсного деления; при указанном на этой фигуре положении секции э. д. с., индуктированные в отдельных проводах, будут вычитаться, а не складываться.

Следует, однако, заметить, что величины обоих частичных шагов y_1 и y_2 в точности равными полюсному делению быть не могут; во избежание преждевременного замыкания обмотки на себя по крайней мере один из шагов должен быть немного больше или меньше полюсного деления.

Свод условий. Резюмируя все вышесказанное, мы получаем следующие условия, которые должны быть соблюдены для получения замкнутой барабанной обмотки:

1. Число проводов (или секционных сторон S при $w>1$) должно быть числом четным.

2. Результирующий шаг обмотки y должен быть числом четным.

3. Частичные шаги y_1 и y_2 должны быть числами нечетными.

4. Число коллекторных пластин K и шаг по коллектору y_k не должны иметь общего делителя.

5. Если K и y_k имеют общего делителя g, то получается многократная g-кратно замкнутая обмотка.

§ 5. Петлевые обмотки. Простая параллельная обмотка. Результирующий шаг простой параллельной обмотки, представляющий собой разность двух частичных шагов, всегда равен 2:

$$y = y_1 - y_2 = \pm 2 \qquad (5,1)$$

и шаг по коллектору

$$y_k = \frac{y}{2} = \pm 1. \qquad (5,2)$$

Величина частичных шагов может быть определена на основании следующих формул:

$$y_1 = \frac{S \pm b}{2 \cdot p}, \qquad (5,3)$$

$$y_2 = \frac{S \pm b}{2 \cdot p} \pm 2, \qquad (5,4)$$

где p — число пар полюсов и b — любое целое число, делающее число y_1 целым и нечетным.

Число b, входящее в формулы (5,3) и (5,4), необходимо выбирать таким, чтобы первый частичный шаг y_1 лишь немного отличался от величины полюсного деления; если $b = 0$, мы получаем так называемую диаметральную обмотку, у которой первый частичный шаг содержит число проводов $\frac{S}{2p}$, равное числу проводов, расположенных по окружности якоря на протяжении одного полюсного деления.

При больших значениях b мы получаем обмотки с сильно укороченным шагом — так называемые хордовые обмотки.

Хордовые обмотки в настоящее время применяются сравнительно редко благодаря многим их недостаткам: эти обмотки имеют широкий коммутационный пояс, что требует широких дополнительных полюсов (см. ниже главу о коммутации), индуктированные э. д. с. в проводах некоторых секций при некоторых их положениях не складываются, а вычитаются, как это было показано в утрированном виде на фиг. 25, благодаря чему уменьшается суммарная индуктированная э. д. с. в параллельном разветвлении якоря.

На фиг. 26 изображена двухполюсная петлевая диаметральная обмотка со следующими данными:

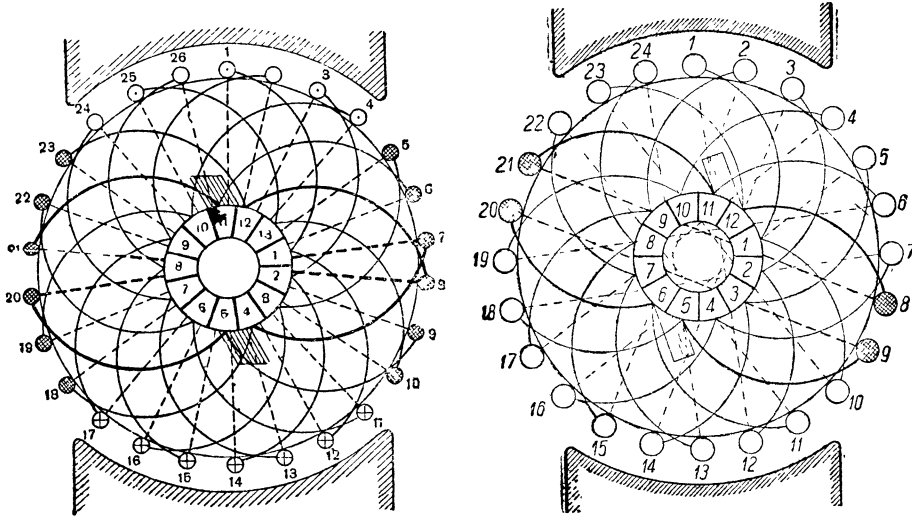
$$S = 26;\ p = 1;\ b = 0;\ K = 13;$$

$$y_1 = \frac{26}{2} = 13;\ y_2 = 13 - 2 = 11.$$

В этой обмотке провод *1* должен быть соединен с проводом $1 + y_1 = 1 + 13 = 14$ с задней торцевой стороны якоря, и провод *14* необходимо соединить с $14 - y_2 = 14 - 11 = 3$ проводом с передней (коллекторной) стороны якоря; провод *3* необходимо соединить с $3 + 13 = 16$; провод *16* с $16 - 11 = 5$ и т. д.

Две параллельные цепи якоря для данного его положения будут следующие:

пластина *11* ⟋ *6-19-4-17-2-15-26-13-24-11-22-9* ⟍ пластина *5*
пластина *12* ⟍ *23-10-25-12-1-14-3-16-5-18* ⟋ пластина *4*.



Фиг. 26. Двухполюсная петлевая-диаметральная обмотка.

Фиг. 27. Петлевая обмотка с небольшим укорочением шага.

Две катушки *7-20* и *8-21* замкнуты на короткое щетками.

На фиг. 27 показана петлевая обмотка с небольшим укорочением шага; данные ее:

$$S=24;\ K=12;\ p=1;\ b=2;$$
$$y_1=\frac{S\pm b}{2p}=\frac{24-2}{2}=11;\ y_2=11-2=9.$$

Максимальная разность потенциалов между двумя соседними катушками барабанной обмотки может достигать полного напряжения машины; так, например, на фиг. 26 между проводами *7-8* обеих короткозамкнутых секций получается полное напряжение, потому что они соединены с двумя разноименными щетками.

На фиг. 28 дан пример четырехполюсной петлевой обмотки; ее данные:

$$S=30;\ K=15;$$
$$p=2;\ b=2;$$
$$y_1=\frac{S-b}{2p}=\frac{30-2}{4}=7;$$
$$y_2=7-2=5$$ [1].

---

[1] Если один из частичных шагов укорочен, то, вообще говоря, целесообразно другой частичный шаг удлинить. Если мы этого не сделаем, то окажется, что в некоторый момент э. д. с., наводимая в двух последовательно соединенных секциях, будет, вместо того чтобы складываться, вычитаться (недостаток хордо-

В этой обмотке необходимо соединить провод *1* с $1+7=8$; *8* с $8-5=3$; *3* с $3+7=10$ и т. д.

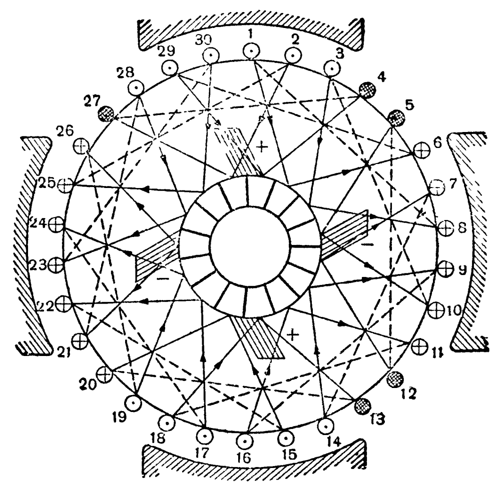
Для данного положения щетками замкнуты на короткое три секции: *4-27*, *5-12* и *13-20*; в обмотке получаются следующие четыре параллельные цепи:

10 - 3 - 8 - 1 - 6 - 29

− *7 - 14 - 9 - 16 - 11 - 18* +

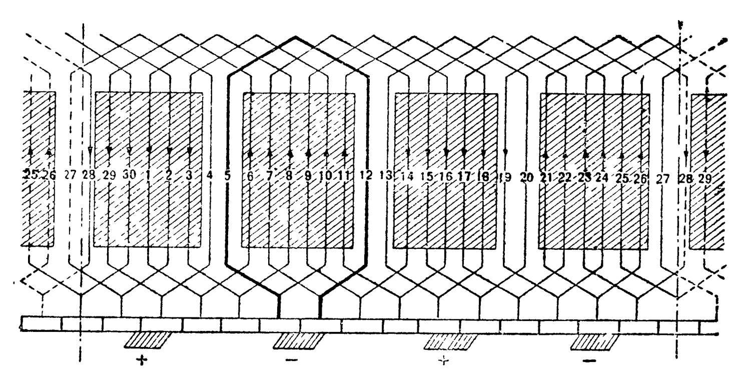
21 - 28 - 23 - 30 - 25 - 2 +

− *26 - 19 - 24 - 17 - 22 - 15*



Фиг. 28. Четырехполюсная петлевая обмотка.

На фиг. 29 показана та же обмотка в развернутом виде; если обходить секции этой обмотки по часовой стрелке по схеме фиг. 29, мы будем все время передвигаться вправо; такая обмотка „с правым ходом“ получается, когда $y_1 > y_2$; если $y_1 < y_2$, то при обходе секций обмотки по часовой стрелке по схеме мы будем перемещаться влево (фиг. 30); такие обмотки называются обмотками с „левым ходом“.[1]



Фиг. 29. Развернутая схема четырехполюсной петлевой обмотки, показанной на фиг. 28.

Многократные параллельные обмотки. В простой параллельной обмотке число параллельных цепей всегда бывает равно числу полюсов:

$$2a = 2p.$$

вой обмотки). Кроме того, при повторном укорочении частичных шагов или удлинении увеличивается ширина коммутирующегося пучка, что в свою очередь вредно отражается на процессе коммутации (см. главу о коммутации).

[1] Ср. фиг. 20 и 30.

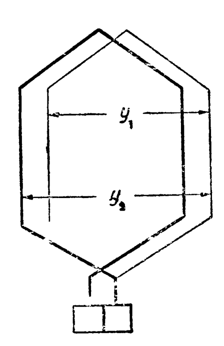
В многократной параллельной обмотке число параллельных цепей может превосходить число полюсов в m раз:

$$2a = 2pm.$$

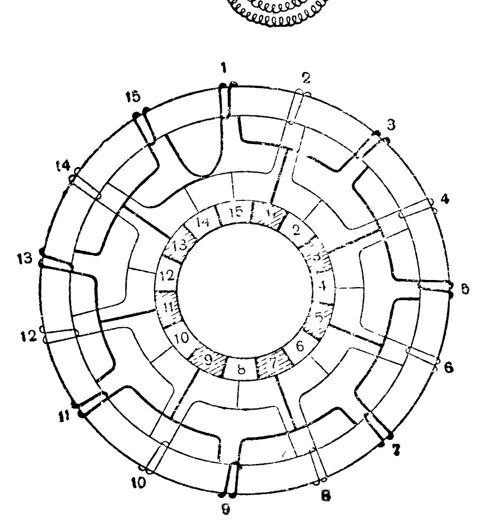
Для выяснения особенностей этих обмоток рассмотрим сначала в качестве примера кольцевую обмотку с числом катушек, равным 15 (фиг. 31); при обматывании этого якоря будем последовательно пропускать по одной катушке, так что коллекторный шаг в этом случае будет равен не 1, как обычно, а будет

$$y_k = 2.$$

Начиная с катушки *1* и обходя последовательно катушки *1*, *3*, *5*, *7*, *9*, *11* и *13*, мы сделаем один оборот по окружности якоря и, придя к катушке *15*, начнем обход окружности снова; сделав второй полный оборот: *15*, *2*, *4*, *6*, *8*, *10*, *12*, *14*, и *1*, придем к исходной нашей катушке *1*, после чего обмотка замкнется на себя.



Фиг. 30. Секция петлевой обмотки.



Фиг. 31. Кольцевая обмотка с двойным повторным вступлением.

Таким образом мы имеем как бы две системы обмоток: одна обмотка заключает в себе все нечетные номера катушек, вторая — все четные; закончив обход одной обмотки, мы вступаем во вторую и, пройдя последнюю, мы снова попадаем в первую; провода первой обмотки на фиг. 31 показаны жирными линиями, и коллекторные пластины, принадлежащие этой обмотке, для наглядности заштрихованы.

Для того чтобы ток равномерно разветвлялся между этими двумя обмотками, необходимо, чтобы щетка всегда перекрывала не менее двух коллекторных пластин.

Таким образом при двухполюсной системе обмотка, изображенная на фиг. 31, имеет не две, а четыре параллельных цепи.

Такие обмотки носят название обмоток с двойным повторным вступлением. Нетрудно убедиться, что при $y_k = 3$ и при условии, что K и y_k не имеют общего делителя, мы получим обмотку с тройным повторным вступлением[1] и т. д.

Если K и y_k имеют общего делителя g, то получается g-кратно замкнутая обмотка.

На фиг. 32 дана схема многократной кольцевой обмотки с $K = S = 16$ и $y_k = 2$; так как K и y_k имеют общего множителя 2, то должна получиться при этом дважды замкнутая обмотка.

Действительно, исходя из катушки *1* и обойдя все нечетные номера *1*, *3*, *5*, *7*, *9*, *11*, *13* и *1*, мы снова вернемся к катушке *1*.

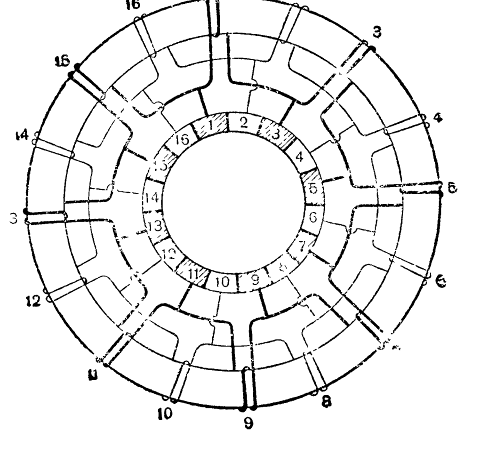
Четные мы можем соединить между собой таким же образом:

2, *4*, *6*, *8*, *10*, *12*, *14* и *2*.

Мы видим, что при указанных условиях получаются две совершенно независимые и не связанные друг с другом кольцевые обмотки; на фиг. 32 эти обмотки показаны линиями разной толщины.

Сказанное здесь о кольцевых обмотках одинаково приложимо и к петлевым барабанным обмоткам.

Для петлевых многократных обмоток мы имеем следующие формулы:



Фиг. 32. Многократная кольцевая обмотка.

$$y_1 = \frac{S \pm b}{2p}; \quad y_2 = \frac{S \pm b}{2p} \pm 2m;$$

$$y = y_1 - y_2 = \pm 2m;$$

$$K = \frac{S}{2}; \quad y_k = \frac{y_1 - y_2}{2} = \pm m; \quad a = m \cdot p.$$

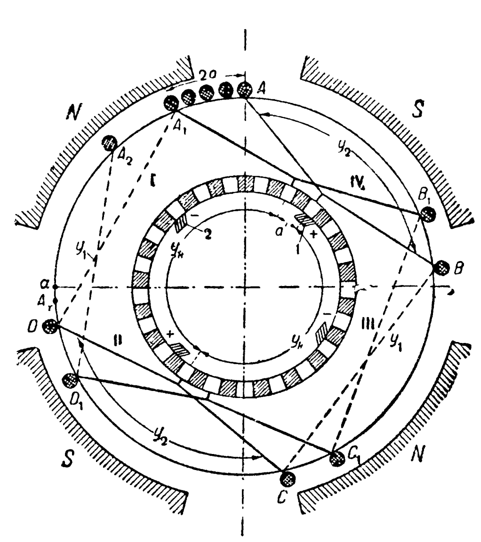
Подставляя в эти формулы $m = 1$, мы получаем соотношения, характеризующие простую параллельную обмотку, у которой $a = p$; при $m =$ целому числу > 1 мы получаем многократную обмотку с числом параллельных цепей $2a = 2m \cdot p$.

При этом, если K и $y_k = m$ не имеют общего делителя, мы получаем параллельную обмотку с m-кратным повторным вступлением; если K и y_k имеют общего делителя, например, n, то получается n-кратно замкнутая петлевая обмотка.

Обмотки этих систем применяются сравнительно редко, при очень больших силах тока в якоре.

[1] В такой обмотке число параллельных цепей будет $2a = 2 \cdot 3$.

§ 6. Волновые обмотки. В волновой обмотке число параллельных цепей может быть или больше числа полюсов, или меньше его, или равным ему в зависимости от величины результирующего шага:



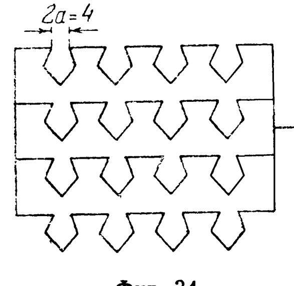
Фиг. 33. Несколько секций волновой обмотки, расположенных на якоре.

$$y = y_1 + y_2.$$

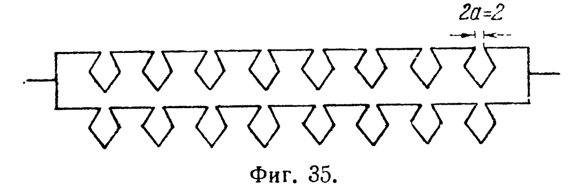
Среди волновых обмоток различаются обмотки параллельные ($a = p$), последовательные ($a = 1$) и последовательно-параллельные ($a > 1$), предложенные впервые Арнольдом (1891 г.).

Следующее правило дает возможность определить число параллельных цепей волновой обмотки: если, выходя из какого-нибудь провода A, мы обойдем один раз всю окружность якоря и вернемся к проводу A_1, отстоящему от исходного на $2a$ проводов, то число параллельных цепей такой обмотки будет $2a$ (фиг. 33).

Последнее правило можно формулировать еще следующим образом: число коллекторных делений, на которое произойдет сдвиг по окружности коллектора, после полного обхода окружности коллектора равно половинному числу параллельных цепей a (фиг. 33, 34, 35, 36). Для пояснения сказанного рассмотрим фиг. 33, на которой схематически изображена окружность четырехполюсного якоря с небольшим числом секций, наложенных на якорь.



Фиг. 34.



Фиг. 35.

Волновая обмотка характеризуется тем, что результирующий шаг ее равен сумме частичных шагов $y = y_1 + y_2$; благодаря этому при обходе обмотки мы все время подвигаемся вперед, делая шаги y_1 и y_2.

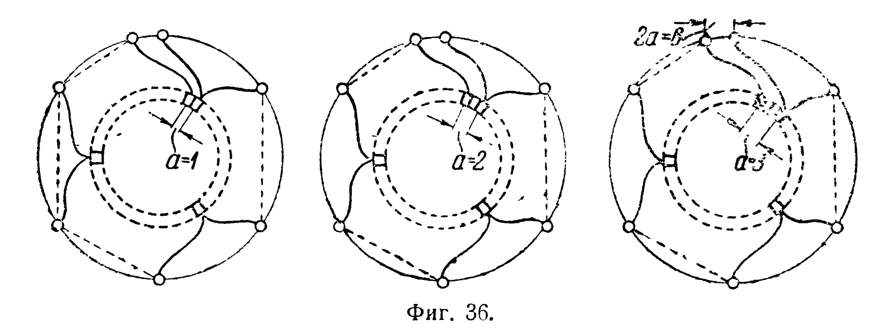
Обмотка, изображенная на фиг. 33, состоит из ряда последовательно соединенных разомкнутых многоугольников $ABCDA_1$, $A_1B_1C_1D_1A_2$ с отверстиями AA_1, A_1A_2, A_2A_3..., равными $2a$; делая

шаги y_1 и y_2, мы после каждого обхода окружности якоря все больше и больше удаляемся от исходной точки A; когда начальная точка A какого-нибудь X-го многоугольника перейдет из квадранта I в II, мы увидим, что в этом многоугольнике направление индуктированных э. д. с. изменится на обратное; отсюда следует, что у точки A_x начинается новая ветвь обмотки.

Отсюда ясно, что каждая параллельная цепь волновой обмотки состоит из $\frac{S}{2p} : 2a$ многоугольников; так как в свою очередь в каждом таком многоугольнике заключается $2p$ проводов, то число проводов в каждой цепи получится

$$\frac{\frac{S}{2p}}{2a} \cdot 2p = \frac{S}{2a};$$

следовательно, общее число параллельных цепей для волновой обмотки должно быть равно $2a$, что и требовалось доказать.



Фиг. 36.

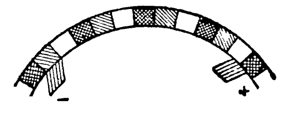
К вопросу о числе параллельных разветвлений волновой обмотки можно подойти также со следующей точки зрения: мы можем себе представить всю волновую обмотку (с $a > 1$), состоящей из ряда „частичных" последовательных обмоток, соединенных между собой параллельно.

Выходя из какой-нибудь пластины, например, 1, и совершив обход всей окружности коллектора в каком-нибудь направлении, мы придем к пластине, отстоящей от 1 на столько коллекторных делений a, сколько „частичных" последовательных обмоток мы желаем получить; оставленные нами свободными при обходе обмотки коллекторные пластины (на фиг. 33 эти пластины заштрихованы) будут предназначаться для других „частичных" обмоток. Так как каждая „частичная" последовательная обмотка имеет две параллельные цепи, то общее число пар параллельных цепей при этом получится a.

Обмотка, изображенная на фиг. 33, состоит из $a=2$ „частичных" последовательных обмоток (коллекторные пластины одной из этих „частичных" обмоток заштрихованы).

Если при обходе всей окружности якоря сдвиг по коллектору будет $a=3$, мы получим шесть параллельных цепей (или три

„частичных" обмотки, соединенных между собой параллельно);[1] на фиг. 37 показана часть коллектора между щетками + и — для этого случая, причем для наглядности пластины, относящиеся к разным „частичным" обмоткам, показаны разной штриховкой.



Фиг. 37. Часть коллектора между двумя щетками.

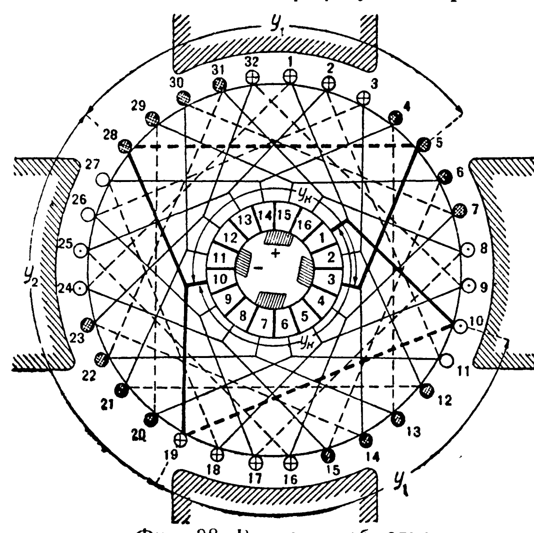
Формулы волновой обмотки. После полного обхода окружности якоря, для чего необходимо сделать p результирующих шагов y, мы приходим к проводу волновой обмотки, который смещен на $2a$ провода относительно исходного; выражая это математически, получаем

$$S = p \cdot y \pm 2a, \tag{6,1}$$

откуда

$$y = \frac{S \pm 2a}{p} = y_1 + y_2; \tag{6,2}$$

к написанным здесь формулам присоединяется



Фиг. 38. Волновая обмотка.

$$y_k = \frac{y}{2} = \frac{y_1 + y_2}{2},$$

$$K = \frac{S}{2};$$

если разделить обе части уравнения (6,2) на 2, мы получим

$$y_k = \frac{y}{2} = \frac{\frac{S}{2} \pm a}{p} = \frac{K \pm a}{p}.$$

Если в выше написанных формулах $a > 1$, то получается так называемая последовательно-параллельная обмотка.

Если при этом числа y_k и K не имеют общего делителя, то получается обмотка однократно замкнутая.

Если числа y_k и K имеют общего делителя g, то получается волновая обмотка g-кратно замкнутая.

Последовательная обмотка. Если подставить во все предыдущие уравнения значение $a = 1$, мы получим

[1] Во всех наших рассуждениях мы предполагаем, что y_k и K не имеют общего делителя; следовательно, все волновые обмотки, рассматриваемые нами для удобства изложения как состоящие из ряда „частичных" обмоток, являются однократно замкнутыми.

формулы для последовательных обмоток (с двумя параллельными цепями):

$$y=\frac{S\pm2^{1}}{p}=y_1+y_2;$$

$$\nu_k=\frac{K\pm1}{p};\quad y_k=\frac{y_1+y_2}{2};\quad K=\frac{S}{2}.$$

Частичные шаги y_1 и y_2, входящие в эти формулы, согласно предыдущему должны быть числами нечетными (немного отличающимися от величины полюсного деления), и результирующий шаг y должен быть числом четным (немного отличающимся от двойной величины полюсного деления).

Пример. На фиг. 38 и 39 в качестве примера даны радиальная и развернутая схемы волновой последовательно - параллельной обмотки со следующими данными:

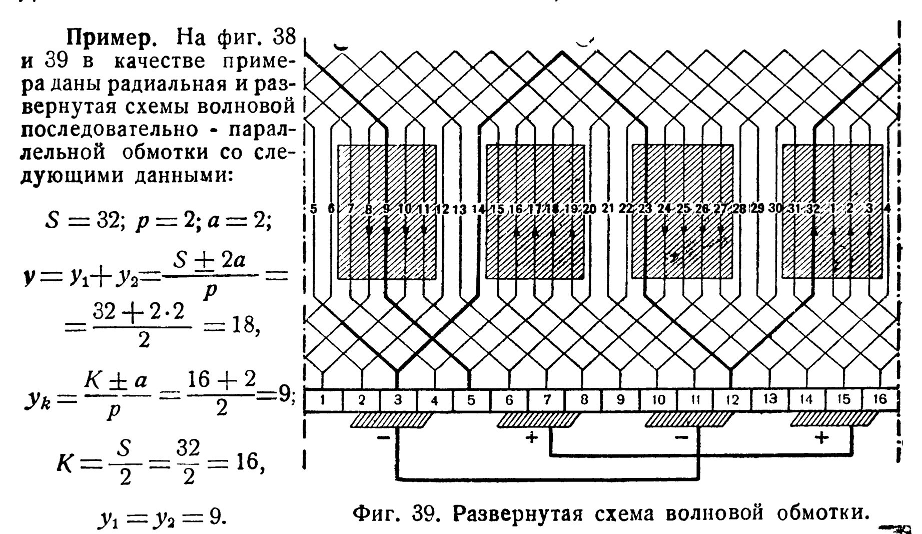
$$S=32;\ p=2;\ a=2;$$

$$y=y_1+y_2=\frac{S\pm2a}{p}=\frac{32+2\cdot2}{2}=18,$$

$$y_k=\frac{K\pm a}{p}=\frac{16+2}{2}=9;$$

$$K=\frac{S}{2}=\frac{32}{2}=16,$$

$$y_1=y_2=9.$$



Фиг. 39. Развернутая схема волновой обмотки.

Так как y_k и K не имеют общего делителя, то получается однократно замкнутая обмотка.

Если на коллектор положены все 4 щетки, то получаются следующие ветви;

$$+\left\{\begin{matrix} 24-\ 1-10-19 \\ 8-17-26-\ 3 \\ 11-\ 2-25-16 \\ 27-18-\ 9-32 \end{matrix}\right\}-$$

Остальные секции замкнуты щетками на короткое.

§ 7. Обмотки с двумя коллекторами. Эти обмотки применяются для машин с очень большой силой тока, при которой получается большая длина коллектора. Для удобства обычно оба коллектора располагаются с обеих сторон якоря.

При этом можно поступить двояко:

1) присоединить оба коллектора к одной общей обмотке;

2) выполнить две совершенно независимые обмотки и присоединить каждую к своему коллектору.

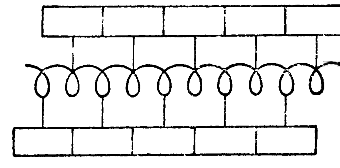
---

[1] Если в уравнении для y мы из двух входящих знаков избираем +, тот же знак должен быть поставлен в уравнении для y_k, и наоборот, если мы избираем знак —, то и в уравнении для y_k должен быть поставлен —.

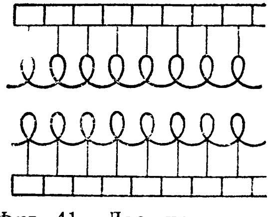
Первый способ (фиг. 40) применяется сравнительно редко, так как при этом бывает очень трудно распределить равномерно ток между двумя коллекторами.

При двух независимых обмотках (фиг. 41) оба коллектора по желанию могут быть соединены между собой или параллельно или последовательно; последнее соединение применяется для машин высокого напряжения.

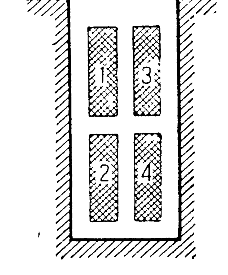
§ 8. Зубчатые якоря. Порядок нумерации проводов. При выводе всех формул для



Фиг. 40. Одна обмотка с двумя коллекторами.



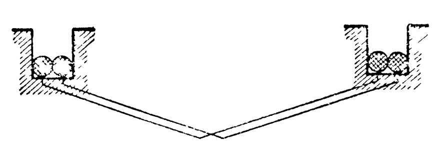
Фиг. 41. Две независимых обмотки с двумя коллекторами.



Фиг. 42. Паз $u_n = 4$.

обмоток, рассмотренных нами выше, мы предполагаем, что имеем дело с гладкими обмотками. Все обмоточные формулы остаются в силе также и для зубчатых якорей при условии определенной нумерации проводов.

В зубчатых якорях с шаблонной обмоткой, у которой на один канал приходится несколько секционных сторон, необходимо начинать нумерацию с верха канала, как показано на фиг. 42; при такой нумерации оказывается, что все провода (или секционные стороны) нижнего слоя обмотки имеют четные номера, а провода верхнего слоя—нечетные.

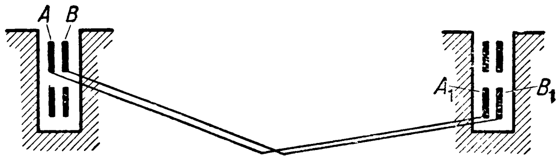


Фиг. 43. Секция ручной обмотки.

Шаблонная и ручная обмотки. Следует различать два способа наложения обмотки на якорь: один способ, когда обмотка наматывается вручную, и второй способ, когда секции сначала изготовляются отдельно на шаблонах и уже затем накладываются на якорь (шаблонная обмотка). Для того чтобы можно было выполнить ручную обмотку, обе стороны секции должны быть уложены в паз, или обе внизу, или обе вверху, как это показано схематически на фиг. 43. Наоборот, при шаблонной обмотке одна сторона секции (например, A на фиг. 44) располагается всегда в верхней части паза, а другая сторона (например, A_1) располагается в нижней части другого паза.

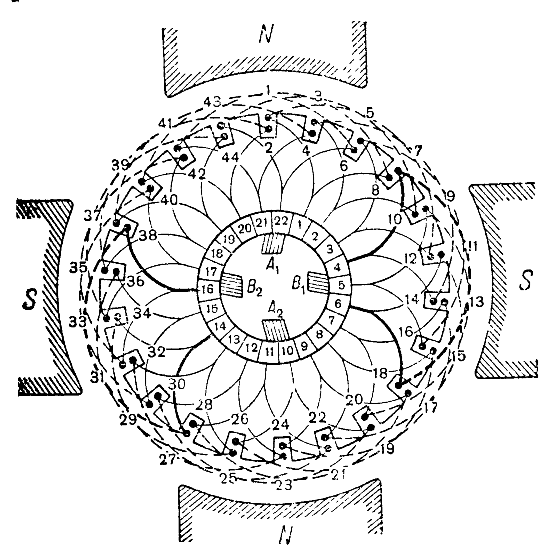
Ручные обмотки в настоящее время применяются редко, только для малых двухполюсных машин, при которых пазы, относящиеся к одной секции, занимают на якоре почти диаметрально противоположное положение, что затрудняет укладку уже готовых секций в пазы якоря.

Зубцовый шаг. Секция обмотки, заложенная в оба паза якоря, обхватывает определенное число зубцов якоря; это число зубцов (соответствующее первому частичному шагу y_1) мы будем называть зубцовым шагом.



Фиг. 44. Расположение в пазах секций шаблонной обмотки.

Для того чтобы обмотка якоря могла быть выполнена на шаблонах, необходимым условием является, чтобы вторые стороны A_1 и B_1 тех катушек, первые стороны которых A и B находятся рядом в канале сверху, оставались бы также и в другом канале внизу рядом (фиг. 44); в этом случае вся группа секций, провода которых лежат в общих пазах, может быть изолирована вся вместе и в виде отдельного целого заложена в пазы якоря (например, на фиг. 44 могут быть изолированы вместе пучки проводов A, B и A_1, B_1).



Фиг. 45. Обмотка зубчатого якоря.

Шаблонная обмотка может быть выполнена при условии, когда

$$y_1 = y_n \cdot u_n + 1, \quad (7,1)$$

где u_n представляет собой число проводов (или секционных сторон), лежащих в одном пазу, и y_n — зубцовый шаг[1].

При соблюдении последнего условия какой-нибудь провод A, лежащий в верхней части паза (фиг. 44), будет соединен с проводом A_1, лежащим в нижней части другого паза и занимающим в нем такое же положение относительно смежных проводов нижнего слоя, какое положение относительно проводов верхнего слоя занимает провод A.

Условию (7,1) должны удовлетворять одинаково петлевые волновые обмотки в том случае, если они должны быть изготовлены на шаблонах.

В качестве примера на фиг. 45 показана обмотка зубчатого якоря, у которой

$$S = 44; \; p = 2;$$

[1] Зубцовый шаг y_n, входящий в формулу (7,1), для получения шаблонной обмотки должен быть обязательно целым числом.

$$a = m \cdot p = 2 \cdot p = 4;$$
$$K = 22;\ y_1 = 11;\ y_2 = 7;$$
$$y = 4;\ y_k = 2.$$

Укорочение шага. Зубцовый шаг должен быть приблизительно равным числу пазов, приходящихся на одно полюсное деление:

$$v_n \leqslant \frac{Z}{2p},$$

где Z — общее число пазов якоря.

Обыкновенно делают ширину секций немного меньше, чем полюсное деление:

$$y_n = \frac{Z}{2p} - \varepsilon_n, \qquad (7,2)$$

где ε_n — укорочение шага, измеренное числом зубцовых делений (ε_n бывает чаще всего дробным числом, меньшим единицы).

В дальнейшем и в главе о коммутации нам необходимо будет знать величину укорочения шага, выраженного числом коллекторных делений.

Принимая во внимание, что на один паз приходится $\frac{u_n}{2}$ коллекторных пластин, мы можем написать

$$\varepsilon = \frac{u_n}{2} \cdot \varepsilon_n; \qquad (7,3)$$

присоединяя к последнему уравнению еще уравнения (7,2) и (7,1), мы получим следующее выражение для ε:

$$\varepsilon = \frac{1}{2}\left(1 + \frac{K}{p} - y_1\right). \qquad (7,4)$$

Мертвые провода. Как было выяснено выше, петлевая обмотка может быть осуществлена для любого четного числа секционных сторон S.

Волновая же обмотка, вообще говоря, не может быть выполнена для любого четного числа сторон S; последнее должно быть таким, чтобы удовлетворялось условие (6,1):

$$S = p \cdot y \pm 2a.$$

Часто случается, что число сторон S, получаемое по формуле (6,1), не укладывается целиком в пазы без остатка и отношение $\frac{S}{u_n}$ не равно целому числу; в этом случае в одном из пазов получается число активных проводов меньше чем u_n; для удобства укрепления проводов часть этого паза приходится заполнять так называемыми „мертвыми“ проводами, совершенно не соединенными с остальными проводами обмотки, а также не имеющими соединений друг с другом. В качестве примера предположим, что у нас $p = 2$, $y = 100$ и $a = 1$; тогда по формуле (6,1) получается

$$S = 2 \cdot 100 + 2 = 202.$$

Если предположить, что в каждом пазу расположено $u_n = 6$ проводов, число необходимых пазов найдем

$$Z = \frac{S}{u_n} = \frac{202}{6} = 33^2/_3,$$

т. е. у нас получится 33 паза полных и один паз, наполненный проводами всего на $^2/_3$, т. е. содержащий всего четыре активных провода; для того чтобы эти четыре провода в пазу не болтались, в этот паз необходимо заложить, кроме того, два мертвых провода.

§ 9. „Ступенчатые", или „лестничные", обмотки. Условие выполнимости шаблонной обмотки требует, чтобы каждый провод секции, лежащий в верхнем слое паза, соединялся с соответственным проводом, лежащим в нижнем слое другого паза, отстоящего от первого на расстоянии ширины секции, равной зубцовому шагу y_n. В этом случае все провода соответственных секций, лежащие рядом в верхнем слое паза, будут лежать в том же порядке в нижнем слое другого паза.

Это дает возможность изолировать отдельные секции как одно целое и закладывать их в виде предварительно изолированного пучка проводов в пазы. Такая обмотка требует, чтобы зубцовый шаг y_n был числом целым.

Но можно также образовать обмотку и при пазовом шаге, равном дробному числу. В этом случае получается обмотка, носящая название „лестничной", или „ступенчатой".

При такой обмотке для коммутации тока создаются несколько более благоприятные условия.

Обычно дробную часть зубцового деления, показывающую, насколько зубцовый шаг больше целого числа зубцовых делений, выражают в долях числа проводов u_n, лежащих в пазу. Так как u_n, а также число сторон, на которое сдвигаются в пазу стороны секции, бывают всегда числами четными, то дробная часть зубцового шага может быть сокращена на два. В этом случае знаменатель дроби здесь получается равным $\frac{u_n}{2}$, числитель же показывает, на сколько проводов сдвинута вторая сторона секции нижнего слоя паза относительно первого провода, лежащего в нижнем слое того же паза.

На фиг. 46 показана часть обмотки с $u_n = 10$ с зубцовым шагом $y_n = 8^4/_{10}$.

Сократив вышенаписанную дробь, получим

$$y_n = 8^2/_5.$$

Здесь знаменатель дроби показывает, сколько проводов (или в общем случае—сторон) секции располагается в одном слое паза, а числитель,—на сколько проводов сдвинута рассматриваемая сторона секции нижнего слоя относительно первого провода того же слоя в том же пазу.

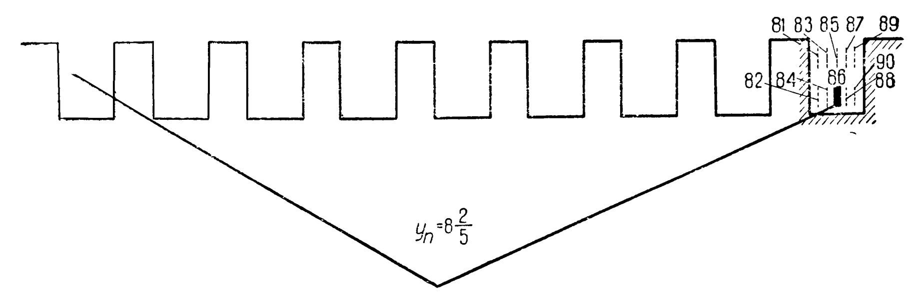
Для обмотки, изображенной на фиг. 46, мы имеем

$$y_1 = y_n \cdot u_n + 1 = 8^2/_5 \cdot 10 + 1 = 85.$$

Как видно из фиг. 46, здесь провод *1* соединяется с проводом $1+85=86$.

Если бы мы приняли y_n = целому числу 8, то первичный частичный шаг оказался бы равным

$$y_1 = y_n u_n + 1 = 8\cdot 10 + 1 = 81.$$



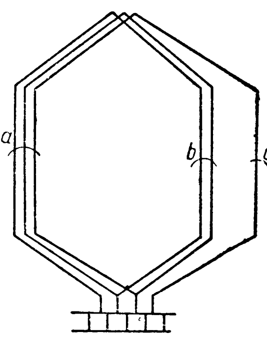
Фиг. 46. Ступенчатая, или лестничная, обмотка.

В последнем случае мы должны были бы соединить провод *1* с проводом $1+81=82$.

На фиг. 47 показан способ закладки секции обычной („равносекционной“) и ступенчатой обмотки в пазы.

В ступенчатой обмотке ее секции одними своими сторонами, например, левыми, лежат, в верхнем слое в общем пазу *a*, в то время как другие стороны этих секций лежат не в одном, а в разных пазах *b* и *c*.

Фиг. 47. Способ закладки секции обычной („равносекционной“) и ступенчатой в пазы.



Фиг. 48. Отдельные секции неодинаковой ширины.

Вследствие этого отдельные секции получаются здесь неодинаковой ширины (фиг. 48).

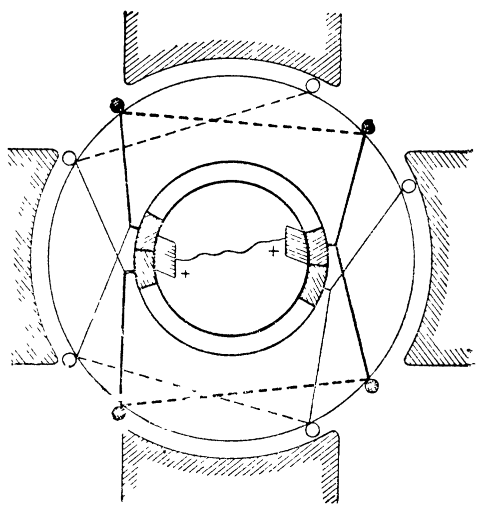
Таким образом „ступенчатая“ обмотка составляется из „коротких“ и „длинных“ секций.

Хотя изготовление ступенчатой обмотки получается несколько дороже, чем равносекционной, тем не менее, первая довольно часто применяется, так как коммутация при ступенчатой обмотке получается несколько лучше, чем при равносекционной.

Однако нельзя упускать из виду, что коммутационная зона при ступенчатой обмотке уширена, что требует соответственного уширения полюсных наконечников

дополнительных полюсов, это является известным недостатком ступенчатых обмоток.

§ 10. Число щеткодержателей. В каждой из секций обмотки якоря ток меняет свое направление в тот момент, когда эта секция проходит при вращении якоря через нейтральную зону.



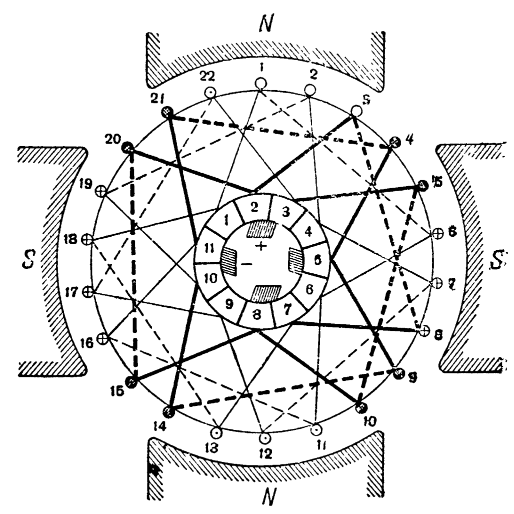
Фиг. 49. Параллельное соединение одноименных щеток волновой обмотки.

Отсюда следует, что щетки могут быть расположены на всех коллекторных пластинах, которые в какой-нибудь момент времени являются соединенными с секциями, находящимися в нейтральной зоне.

Так как число нейтральных зон всегда равно числу полюсов, то отсюда следует, что для всякой замкнутой обмотки число щеткодержателей может быть равным числу полюсов.

Для петлевой обмотки число щеткодержателей должно всегда быть равно числу полюсов машины.

В волновой последовательной обмотке число щеткодержателей может быть уменьшено до двух, так как в этой обмотке все одноименные щетки оказываются соединенными между собой через посредство секции самой обмотки (фиг. 49 и 50).



Фиг. 50. Волновая обмотка.

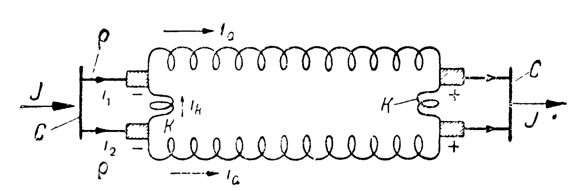
Этим свойством последовательной обмотки пользуются, однако, в редких случаях (например, для трамвайных двигателей), так как уменьшение числа щеткодержателей несколько нарушает симметрию обмотки и ухудшает условия коммутации (см. главу о коммутации); в большинстве же случаев число щеткодержателей для якоря волновой обмотки делают равным числу полюсов.

Как уже было сказано, в волновых обмотках все одноименные щетки соединяются между собой внутри самой обмотки через посредство секций, находящихся в данный момент

времени в нейтральной зоне (фиг. 49). На фиг. 51 схематически показана последовательная обмотка якоря четырехполюсной машины, состоящая из двух параллельных цепей, двух положительных и двух отрицательных щеток, соединенных между собой параллельно двояким образом: через посредство сборных полос C и через посредство короткозамкнутых секций K; как видно из фиг. 51 ток, протекающий к обмотке якоря I, будет разветвляться между обеими одноименными щетками на токи i_1, i_2, величина которых будет изменяться обратно пропорционально величине контактного сопротивления щеток.

Эта опасность перегрузки некоторой части щеток возрастает с увеличением числа полюсов машины и, следовательно, числа одноименных щеток.

Для того чтобы получить равномерное распределение тока между одноименными щетками, иногда соединительным проводникам C и C, соединяющим одноименные щетки со сборными полосами, придают несколько большее сопротивление (фиг. 51).



Фиг. 51. Последовательная обмотка якоря четырехполюсной машины.

В обмотках петлевых, в тех случаях, когда они не имеют уравнительных соединений, одноименные щетки не имеют соединения между собой внутри обмотки, и распределение тока между этими одноименными щетками в меньшей степени зависит от величины их контактного сопротивления; в этом случае в противоположность с волновой обмоткой мы имеем бóльшую гарантию равномерного распределения тока между одноименными щетками.

§ 11. Условие симметричности якорных обмоток. Всякую замкнутую обмотку можно представить себе как бы состоящей из a самостоятельных пар параллельных цепей, соединенных между собой параллельно.

Для полной симметричности якорной обмотки необходимо соблюдение следующих условий:

1. Число секций в каждом параллельном разветвлении обмотки должно быть постоянно. Для соблюдения этого условия необходимо, чтобы

$$\frac{S}{2a} = \frac{K}{a} = \text{целому числу.}$$

2. Каждая пара ветвей обмотки должна находиться в одинаковом числе пазов; для этого необходимо, чтобы

$$\frac{Z}{a} = \text{целому числу.}$$

3. При всяком положении якоря относительно полюсной системы каждой секционной стороне, занимающей в какой-нибудь момент времени определенное положение под одним каким-

нибудь полюсом одной ветви, должна соответствовать какая-нибудь секционная сторона, принадлежащая другой ветви, расположенная совершенно одинаково под одним из других полюсов той же полярности.

Для соблюдения последнего условия необходимо, чтобы

$$\frac{2p}{a} = \text{целому числу.}$$

Условие симметричности петлевой обмотки. Так как для петлевой параллельной обмотки мы имеем $a = p$, то приведенные выше условия получают следующий вид:

$$\frac{K}{p} = \text{целому числу и } \frac{Z}{p} = \text{целому числу.}$$ [1]

Условие симметричности последовательной обмотки ($a = 1$) выражается следующим образом:

$$\frac{K}{a} = \text{целому числу; } \frac{Z}{a} = \text{целому числу.}$$ [2]

Для полной симметрии необходимо, чтобы $\frac{S}{Z}$ было также целым числом, т. е. чтобы во всех пазах якоря было расположено одинаковое число проводников. Как было выяснено выше, от соблюдения этого условия иногда приходится отказываться, закладывая в пазы так называемые мертвые провода.

Условие симметричности последовательно-параллельной обмотки.

$$\frac{K}{a} = \text{целому числу;}$$

$$\frac{Z}{a} = \text{целому числу;}$$

$$\frac{2p}{a} = \text{целому числу.}$$

Первое из написанных здесь условий приводит к требованию, чтобы

$$\frac{p}{a} = \text{целому числу.}$$

Действительно, переписывая выражение

$$y_k = \frac{K \pm a}{p}$$

в таком виде

$$\frac{p}{a} y_k = \frac{K}{a} \pm 1,$$

---

[1] Третье условие, а именно $\frac{2p}{a}$ = целому числу, для петлевой обмотки всегда удовлетворено, так как в простой петлевой обмотке имеется всегда налицо равенство $2a = 2p$, или $a = p$.

[2] Третье условие в последовательной обмотке всегда осуществляется, так как по сути самой обмотки $a = 1$, следовательно, $\frac{2p}{a} = 2p$ = целому числу.

замечаем, что при $\frac{K}{a}$ = целому числу отношение $\frac{p}{a}$ также должно быть целым числом.

§ 12. Сравнение свойств петлевых и волновых обмоток. а) При петлевой обмотке каждая ветвь ее находится под определенной парой полюсов, при этом каждая ветвь, обтекаемая током, соответственно создает ампервитки реакции якоря, величина которых зависит от величины протекающего по этой ветви тока.

При таких условиях, если какая-либо из ветвей якоря окажется нагруженной чрезмерно большой силой тока, это вызовет соответственное усиление ампервитков этой ветви, в результате этого магнитное поле той пары полюсов, под которой лежит данная ветвь якоря, окажется соответственно ослабленным, что ограничит э. д. с. и ток в перегруженной ветви.

Вследствие этого в петлевой обмотке всякие случайные неравномерности нагрузки отдельных параллельных ветвей обмотки (которые могут быть вызваны магнитной несимметрией, неодинаковым сопротивлением отдельных ветвей и т. п.) автоматически сглаживаются и ликвидируются. Петлевая обмотка, таким образом, менее чувствительно реагирует на неодинаковые сопротивления между щеткой и коллектором.

В волновой обмотке мы имеем совершенно другие условия. Здесь каждая ветвь обмотки расположена под всеми полюсами, в волновой обмотке провода всех ветвей, так сказать, перемешаны друг с другом. В такой обмотке ампервитки реакции якоря под каждой парой полюсов создаются сообща проводами всех ветвей обмотки.

Поэтому в волновой обмотке неравномерности нагрузки отдельных параллельных ветвей не выравниваются, как это имеет место в петлевой обмотке.

Отсюда следует, что в отношении коммутации петлевой обмотки следует отдать предпочтение перед волновой; во всех трудных случаях (большая окружная скорость, большие мощности и т. п.) рекомендуется поэтому применять петлевые обмотки.

б) З а в о д с к о й с п о с о б и з о б р а ж е н и я о б м о т о к и и х н у м е р а ц и я. Вместо того чтобы нумеровать в отдельности верхний и нижний провод каждой секционной стороны, как это делает Арнольд и как принято в предыдущих параграфах этой главы, можно одним общим номером одновременно обозначить верхний и нижний элементы секции.

Такой метод обозначения принят на электромашиностроительных заводах.

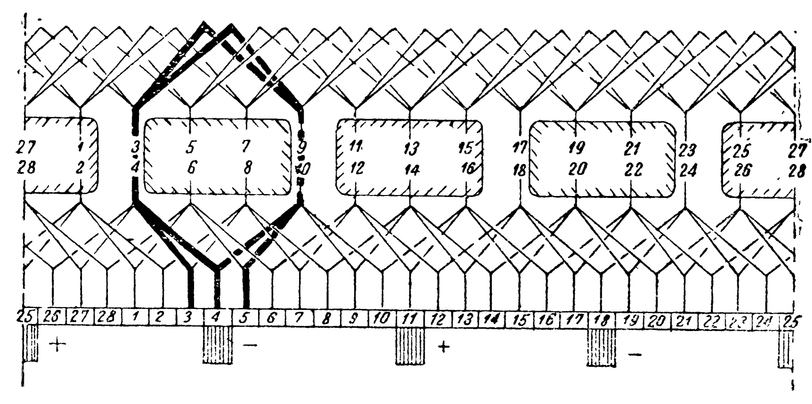
Поэтому в настоящем параграфе дается краткое описание этого заводского способа изображения обмоток.

Особенность этого способа обозначения поясняет фиг. 51а, где изображена по Рихтеру[1] обыкновенная четырехполюсная петлевая обмотка.

---

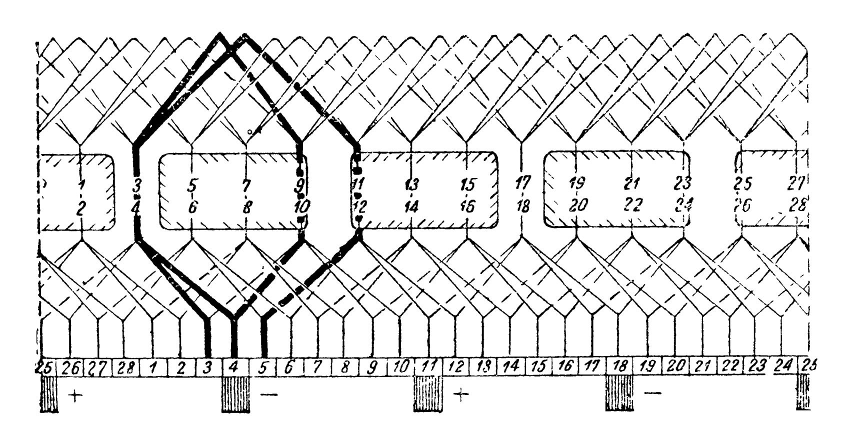
[1] См. Р и х т е р, Электрические машины, т. 1.

В этой обмотке в каждом пазу расположено четыре провода, т. е. $u_n = 4$, или $u = 2$. [1] Шаги обмотки $y_1 = 6$, $y_2 = 5$. Пазовый, или зубцовый, шаг: $y_n = 3$; таким образом провода первого паза здесь соединяются с проводами $1 + y_n = 1 + 3$, т. е. четвертого паза.



Фиг. 51a.

На фиг. 51a два провода, рядом расположенные в одном слое паза, показаны слитно одной толстой линией. Для того чтобы на чертеже отметить, что в каждом слое паза расположено по два провода, торцевые части секции показаны раздельно (по две линии с торца на фиг. 51a).



Фиг. 51b.

Из предыдущего понятно, что провода *3* и *4* верхнего слоя на фиг. 51a соединяются с проводами *9* и *10* нижнего слоя, про-

[1] Здесь через u обозначено число проводов одного слоя, лежащих рядом в пазу. Очевидно: $u = \frac{u_n}{2}$.

вода *5* и *6* верхнего слоя — с проводами *11* и *12* нижнего слоя и т. д.

Такой способ изображения обмоток проще и нагляднее и поэтому принят, как было сказано, в заводской практике.

На фиг. 51b показана на основании такого же способа обозначения четырехполюсная ступенчатая петлевая обмотка для $u_n = 4$, $u = 2$ и $y_n = 3^1/_2$.

ГЛАВА ВТОРАЯ

УРАВНИТЕЛЬНЫЕ СОЕДИНЕНИЯ; Э. Д. С. ЯКОРЯ

§ 13. Цель уравнительных соединений. Даже при удовлетворении всех условий симметричности, рассмотренных нами в § 11, нельзя быть твердо уверенным в том, что многополюсный якорь по изготовлении окажется вполне симметричным.

Одной из причин несимметричности обмотки может быть несимметричность самой магнитной системы машины; на практике часто случается, что магнитные потоки одноименных полюсов получаются различными. Различие это может появиться от раковин в отливке станины, от неправильности в ее форме, от неточности обработки и сборки машин и т. п.

Часто причиной несимметричности магнитной системы служит эксцентрическое положение якоря, благодаря чему магнитный поток увеличивается в тех полюсах, к которым якорь приближен, и значительно ослабляется в тех полюсах, от которых якорь удален.

Волновые и петлевые обмотки по-разному реагируют на несимметричность магнитной системы.

В волновой обмотке провода каждой параллельной ветви равномерно распределены под всеми полюсами магнитной системы; поэтому магнитная несимметричность здесь не влечет за собой неравенства в э. д. с., индуктированных в отдельных ветвях.

В петлевой обмотке провода одной параллельной ветви лежат под одной какой-нибудь парой полюсов, и вследствие этого всякая несимметричность магнитной системы влечет за собой неравенство э. д. с., индуктированных в отдельных параллельных ветвях.

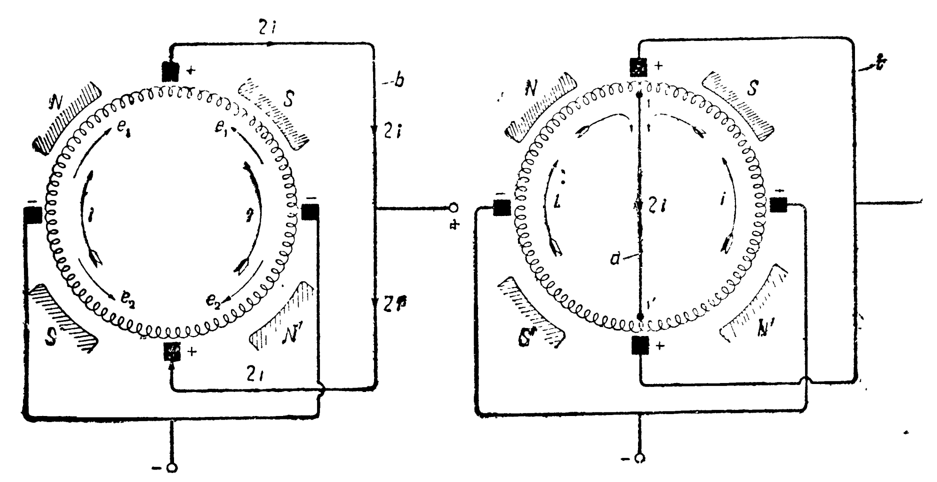
Для иллюстрации сказанного на фиг. 52 схематически показана четырехполюсная кольцевая обмотка якоря; последний, как видно из этой фигуры, расположен эксцентрично относительно полюсов, благодаря чему воздушный зазор под полюсами N и S получился меньшим, чем под полюсами $N'S^1$.

В результате такой несимметричности э. д. с. e_1, e_1, индуктированные при работе машины, в двух верхних квадрантах обмотки получаются больше, чем э. д. с. e_2, e_2 двух нижних квадрантов; следствием этого являются выравнивающие токи i, i, текущие внутри обмотки якоря и замыкающиеся затем через положительные щетки и соединительный провод b. Эти выравнивающие

токи будут протекать внутри обмотки якоря независимо от того, замкнуты зажимы машины + и — на какую-либо внешнюю цепь или нет, т. е. независимо от того, нагружена машина или нет. Выравнивающие токи вредно отражаются на работе машины, понижая ее к. п. д. и вызывая искрение тех щеток, которые перегружены большей плотностью тока в контакте.

Для избежания такой неравномерной нагрузки щеток имеется следующее средство: необходимо выравнивающие токи направить по таким путям, чтобы равномерность плотности тока под щетками не нарушалась.

Для этой цели необходимо отыскать точки равного потенциала внутри самого якоря и соединить их между собой проводами малого сопротивления.



Фиг. 52. Путь выравнивающих токов i в якоре без уравнительных соединений.

Фиг. 53. Путь выравнивающих токов i в якоре с уравнительным соединением a.

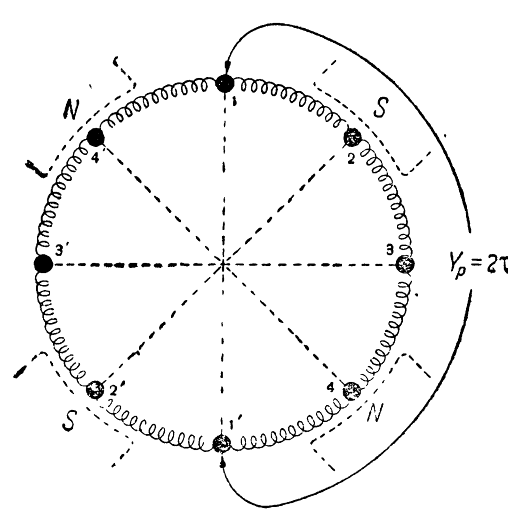
Действительно, если соединить между собой какие-нибудь равнопотенциальные точки *1-1'* обмотки якоря (удаленные друг от друга на двойное полюсное деление 2τ), то мы увидим, что в момент нахождения этих точек под щетками, как показано на фиг. 53, выравнивающий ток $2i$ вместо того, чтобы замыкаться через щетки и внешний соединительный провод b, как это имело место на фиг. 52, предпочтет выбрать для себя более короткий путь соединительного провода a, минуя щетки.

Для того чтобы иметь полную гарантию в том, что ток при вращении якоря будет более или менее равномерно делиться между одноименными щетками, необходимо вышеописанные соединения a, или, как их обычно называют, уравнительные соединения, выполнять в достаточно большом количестве. На фиг. 54 показана схема четырехполюсной обмотки якоря с четырьмя уравнительными соединениями: *1-1'*, *2-2'*, *3-3'* и *4-4'*.

Как уже было упомянуто выше, эти соединения должны иметь

по возможности малое сопротивление, так как только в этом случае уравнительные токи направятся не через коллектор к щеткам, а по самым уравнительным соединениям. Эти уравнительные соединения *a, a, a*... способствуют равномерному распределению тока между параллельными ветвями обмотки якоря.

Так как э. д. с., индуктированные в отдельных витках обмотки якоря,—переменные, то и выравнивающие токи, текущие по уравнительным соединениям,—тоже переменные; благодаря большой самоиндукции обмотки якоря они отстают по фазе приблизительно на 90° от вызывающих их э. д. с. и стремятся ослабить поле магнитов с большим магнитным потоком (по закону Ленца).



Фиг. 54. Уравнительные токи в обмотке якоря *1-1'*; *2-2'*; *3-3'* и т. д.

Свойство уравнительных соединений действовать выравнивающим образом на магнитные потоки полюсов является чрезвычайно ценным, так как последнее в известной мере предохраняет якорь от одностороннего притяжения при магнитных несимметриях.

В волновых обмотках, как уже было сказано, магнитная несимметричность не влечет за собой неравенства в э. д. с., индуктированных в параллельных ветвях; поэтому в волновых последовательно-параллельных обмотках при несимметричном поле не могут возникнуть внутренние токи в якоре до тех пор, пока нет уравнительных соединений; если устроить уравнительные соединения, то возникают выравнивающие токи.

По причине, изложенной в § 15, в волновых обмотках уравнительные соединения чаще называют другим термином: эквипотенциальными соединениями.

На первый взгляд может показаться, что эквипотенциальные соединения при волновых обмотках только вредны.

Однако опыт показывает, что они чрезвычайно необходимы для хорошей коммутации машины.

Причиной этому служат следующие два обстоятельства: во-первых, эквипотенциальные соединения дают равномерное распределение токов между различными группами щеток и, во-вторых, они дают дополнительным коммутационным токам второй путь, вследствие чего щетки разгружаются частично от этих токов (гл. V).

При полной симметричности обмотки якоря, строго центрированном расположении якоря относительно полюсов и одина-

ковых потоках всех полюсов в эквипотенциальных соединениях ток должен отсутствовать. На практике, однако, обычно приходится иметь дело с некоторой асимметрией, благодаря чему в эквипотенциальных соединениях обычно протекает более или менее значительный ток.

§ 14. Шаг уравнительных соединений. Необходимым условием для того, чтобы было возможно соединить между собой две точки, принадлежащие к разным параллельным ветвям обмотки якоря, является полное отсутствие разности потенциалов между этими точками при вращении якоря.

Во всех обмотках, для которых соблюдены разобранные выше условия симметричности:

$$\frac{K}{a} = \text{целому числу};$$

$$\frac{Z}{a} = \text{целому числу};$$

$$\frac{2p}{a} = \text{целому числу},$$

можно найти эквипотенциальные точки. [1]

Всякая симметричная обмотка состоит из a пар совершенно одинаковых ветвей, поэтому на окружности якоря для такой обмотки всегда можно отыскать a точек, имеющих одинаковое положение в магнитном поле; эти все точки могут быть соединены между собой.

Расстояние между эквипотенциальными точками, называемое *потенциальным шагом* и выраженное в коллекторных делениях, может быть найдено следующим образом:

$$y_p = \frac{K}{a}; \tag{14,1}$$

для петлевой обмотки мы имеем

$$y_p = \frac{K}{p}.$$

В обмотках, имеющих число параллельных ветвей не больше двух ($a = 1$), не бывает эквипотенциальных точек; поэтому в двухполюсных машинах и многополюсных последовательных якорях ($a = 1$) уравнительные соединения невозможны.

На фиг. 55 показаны схематически уравнительные соединения (на коллекторе) для шестиполюсной петлевой обмотки, для которой

$$K = 24; \; a = p = 3; \; y_p = \frac{K}{p} = \frac{24}{3} = 8;$$

---

[1] В некоторых несимметричных обмотках тоже можно сделать уравнительные соединения. Ввиду сравнительно малого распространения несимметричных обмоток этот вопрос здесь не рассматривается (Арнольд, т. I).

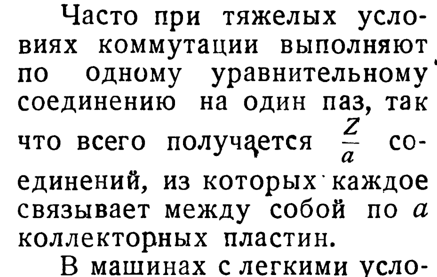
коллекторные пластины этой обмотки соединены между собой следующим образом:

1 - 9 - 17
3 - 11 - 19
5 - 13 - 21
7 - 15 - 23

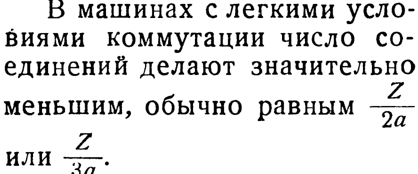
На фиг. 55 коллекторные пластины с четными номерами не имеют уравнительных соединений.

Уравнительные соединения в таком большом числе выполняются только в случае быстроходных машин большой мощности. В турбогенераторах, находящихся в чрезвычайно тяжелых условиях работы в отношении коммутации, уравнительными соединениями снабжают иногда даже все коллекторные пластины без исключения.

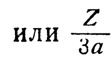
Фиг. 55. Уравнительные соединения шестиполюсной обмотки.



Часто при тяжелых условиях коммутации выполняют по одному уравнительному соединению на один паз, так что всего получается $\frac{Z}{a}$ соединений, из которых каждое связывает между собой по a коллекторных пластин.



В машинах с легкими условиями коммутации число соединений делают значительно меньшим, обычно равным $\frac{Z}{2a}$



или $\frac{Z}{3a}$.

§ 15. Классификация уравнительных соединений.

По Рихтеру[1] уравнительные соединения можно классифицировать в зависимости от типа обмотки якорей, где они применяются.

Рихтер различает уравнительные соединения 1, 2 и 3-го рода.

Уравнительные соединения первого рода

(*простые петлевые обмотки*)

В случае простых петлевых обмоток для выравнивания магнитных потоков отдельных полюсов и во избежание неравномерного распределения тока между одноименными щетками применяются уравнительные соединения. Этот тип можно назвать **уравнительными соединениями первого рода** (см. $a-b$ на фиг. 56).

Большое число уравнительных соединений способствует равномерному распределению тока между одноименными щеточными

[1] См. Рихтер, Электрические машины, т. I, стр. 98.

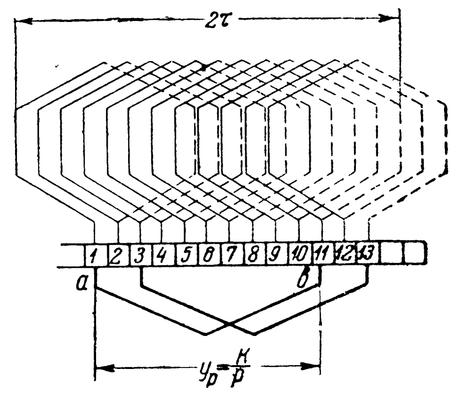
болтами и между отдельными ветвями петлевой обмотки, а также способствует уничтожению магнитной асимметрии машины.

Уравнительные соединения второго рода

(*последовательно-параллельные волновые обмотки*)

В случае последовательно-параллельных волновых обмоток часто трудно бывает получить равномерное распределение потенциала по коллектору.

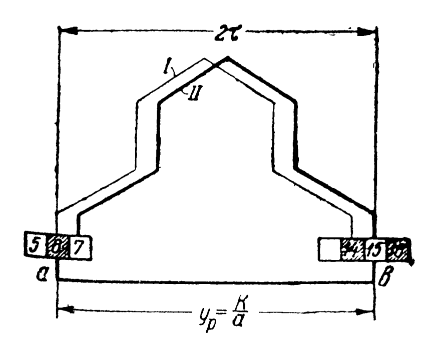
Для устранения этого дефекта, т. е. для получения равномерного распределения потенциала по коллектору, в таких обмотках применяются уравнительные соединения, которые в этом случае носят название уравнительных соединений второго рода (фиг. 57).



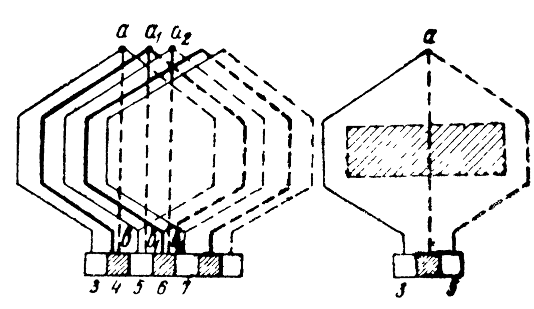
Фиг. 56. Уравнительные соединения первого рода.

Если бы в таких волновых обмотках уравнительные соединения отсутствовали, то параллельная связь между отдельными ветвями обмоток была бы установлена через контакт одноименных щеток.

Так как сопротивление контакта щеток при вращении коллектора сильно колеблется, то при равных условиях в волновых обмотках невозможно было бы получить равномерное распределение тока между отдельными частичными обмотками. Вследствие этого появилось бы колебание величины напряжения между смежными коллекторными пластинами, что скверно отразилось бы на коммутации.



Фиг. 57. Уравнительные соединения второго рода.



Фиг. 58. Уравнительные соединения третьего рода.

Для пояснения на фиг. 57 показана волновая обмотка; при этом секции одной обмотки *I* соединяются с четными пласти-

нами (заштрихованы на фигуре), а секции другой обмотки *II* соединяются с нечетным и коллекторными пластинами (не заштрихованы на фигуре).

На фиг. 58 коллекторная пластина *6* (заштрихована) обмотки *I* соединена при помощи уравнительного соединения $a-b$ с пластиной *15* другой обмотки *II*.

При наличии уравнительного соединения $a-b$ напряжение между пластинами *5—7* делится пластиной *6* приблизительно пополам.

Если бы уравнительного соединения $a-b$ не было, то были бы возможны резкие колебания напряжения между соседними пластинами *5—6—7*, что может ухудшить коммутацию.

Уравнительные соединения третьего рода
(*двухходовые петлевые обмотки*)

В двухходовой петлевой обмотке представляется возможность уменьшить вдвое индуктивность короткозамкнутого щеткой контура.

На фиг. 58 показана для примера двухходовая петлевая обмотка, причем для ясности секции обмотки первого цикла показаны тонкими линиями, а секции обмотки второго цикла жирными линиями. Коллекторные пластины второй обмотки для наглядности заштрихованы.

На фиг. 58 показана одна секция, присоединенная к коллекторным пластинам *3—5*. Если соединить точку *a* секции с промежуточной коллекторной пластиной *4*, то вся секция теперь будет разбита на два контура, сцепленные с магнитным потоком половинной величины.

Отсюда видно, что индуктивность короткозамкнутого щеткой контура может быть таким образом уменьшена вдвое.

На фиг. 58 показана полная схема обмотки с уравнительными соединениями третьего рода $a-b$, a_1-b_1, a_2-b_2 и т. д.

Эти проводники соединяют точки обмотки якоря на противоположных сторонах якоря и располагаются между железом якоря и валом.

Соединения третьего рода применяются редко, в исключительных случаях.

§ 16. „Лягушачья" обмотка. Недавно американские инженеры Powell и Albrecht предложили обмотку, представляющую собой сочетание волновой и петлевой обмоток.[1]

Эта новая система характеризуется тем, что вся обмотка состоит из равного числа секций петлевой и волновой обмоток.

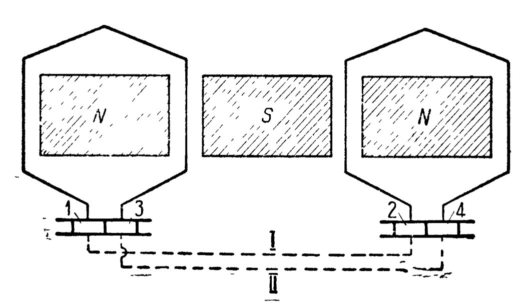
Характерная особенность и выгодность этой обмотки заключается в том, что она не требует совершенно уравнительных соединений. Роль последних принимают на себя, как будет показано ниже, самые секции эт обмотки.

---

[1] См. „Elektrotechnische Zeitschrift" № 31, 1931, статья Sequenz'a и „Электричество" № 17—18, 1932, статья Левитуса.

Эти обмотки в Америке заводом „Allis Chalmers Mg. Co“ применяются в мощных двигателях для привода прокатных станов. У нас Харьковский электромашиностроительный завод (ХЭМЗ) построил ряд машин с такими обмотками.

Основные свойства новой обмотки легче всего понять, сравнивая между собой фиг. 59 и 60. На фиг. 59 показаны секции петлевой обмотки; на фиг. 60 показана новая „лягушачья“ обмотка. Как видно из фиг. 60, эта лягушачья обмотка состоит из равного числа секций *S* петлевой обмотки и секций *W* волновой обмотки. Провода обеих обмоток обычно берутся равного сечения, на фиг. 60 для наглядности секция *W* волновой обмотки показана жирными линиями.



Фиг. 59. Секции петлевой обмотки.

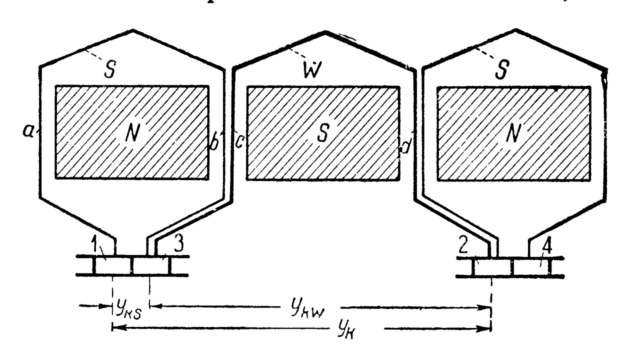
Как видно из фиг. 60, секции *S* петлевой обмотки присоединены соответственно к пластинам коллектора *1-3* и *2-4*.

Секция *W* волновой обмотки на фиг. 60 присоединена к пластинам *3-2*.

Таким образом в пазы якоря здесь закладываются по существу две обмотки: одна петлевая и другая волновая с тем же числом витков и параллельных ветвей При этом обе обмотки присоединены к одним и тем же коллекторным пластинам.

На фиг. 61 показана секция лягушачьей обмотки (форма секций этой обмотки несколько похожа на лягушку, откуда и название этой обмотки).

Как видно из фиг. 61, обмотка укладывается в четыре слоя. В верхнем и нижнем слоях расположены провода одной обмотки, а в двух средних слоях расположены провода другой обмотки.



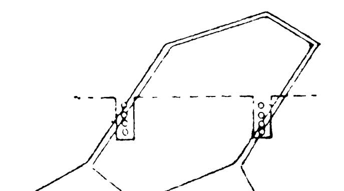
Фиг. 60. Лягушачья обмотка.

Как было сказано выше, основным достоинством новой обмотки является то, что здесь отпадает необходимость в эквипотенциальных соединениях, так как роль последних принимают на себя самые секции обмотки. Секции волновой обмотки здесь играют роль уравнительных соединений первого рода. Что

это именно так, можно убедиться, сравнивая между собой фиг. 59 и 60.

Обратимся сначала к фиг. 59 где показана обычная петлевая обмотка. Здесь пунктирными линиями показаны эквипотенциальные соединения *I-II*, соединяющие коллекторные пластины равного потенциала, удаленные друг от друга на расстояние $\frac{k}{p}$.

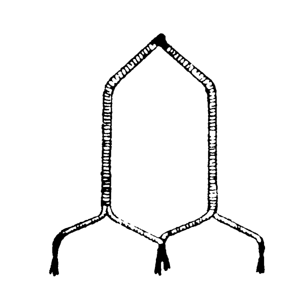
Обращаясь к фиг. 60, где изображена „лягушачья“ обмотка, мы видим, что пластины *1-2* оказываются здесь между собой соединенными посредством проводов самих секций *abcd*. Заметим, что при обходе этого контура *abcd* сумма э. д. с., индуктированных в его проводах, равна нулю, таким образом этот контур, составленный из рабочих проводов обмотки, играет роль уравнительного соединения.



Для того чтобы между собой были соединены пластины одного потенциала, необходимо, чтобы шаги по коллектору шлейфовой обмотки y_{ks} и волновой обмотки y_{kw} удовлетворяли следующему условию:

$$y_{ks}+y_{kw}=\frac{k}{p}=y_k. \qquad (16,1)$$

В этом случае сумма э. д. с., индуктированных в контуре *abcd*, будет равна нулю, и этот контур будет играть роль эквипотенциального соединения.



Фиг. 61. Секция лягушачьей обмотки.

В лягушачьей обмотке сумма пазовых шагов волновой и петлевой обмоток должна быть равна числу пазов на пару полюсов:

$$y_{ns}+y_{nw}=\frac{Z}{p}. \qquad (16,2)$$

Уравнение (16,2) можно получить из уравнения (16,1), разделив первое на число коллекторных пластин, приходящееся на один паз.

В диаметральных обмотках пазовые шаги для петлевой и волновой обмоток должны быть равны, и число пазов, приходящееся на полюс, должно быть равно

$$y_{ns}=y_{nw}=\frac{Z}{2p}. \qquad (16,3)$$

Последнее выражение (16,3) требует, чтобы число пазов, приходящихся на пару полюсов, было числом четным.

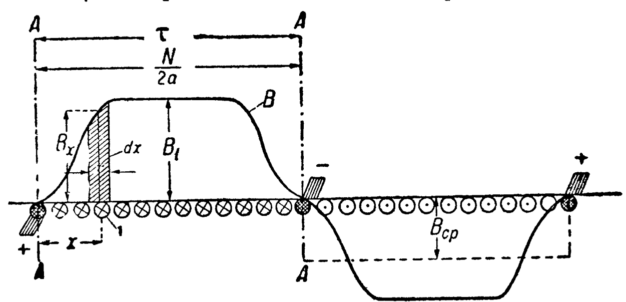
Если $\frac{Z}{p}$ нечетное число, то приходится брать шаги различными, но так, чтобы при укорочении шага петлевой обмотки шаг волновой обмотки был соответственно удлинен, и наоборот, с таким расчетом, чтобы условие (16,1) было соблюдено.

Из предыдущего ясно, что число параллельных путей в лягушачьей обмотке удваивается по сравнению с обычными обмотками.

Для низковольтных многоамперных машин это свойство лягушачьей обмотки является особенно ценным.

§ 17. Электродвижущая сила якоря. На фиг. 62 схематически показана развернутая поверхность многополюсной идеальной барабанной обмотки, обмоточные шаги которой равны полюсному делению.

На этой же фигуре показана кривая распределения магнитной индукции в воздушном зазоре машины B; в тех местах, где эта кривая пересекает ось абсцисс, находятся так называемые нейтральные зоны магнитного поля; расстояние между двумя нейтральными зонами равно полюсному делению τ (на фиг. 62 щетки + и — расположены в нейтральных зонах).



Фиг. 62. Кривая распределения магнитной индукции в воздушном зазоре.

При вращении якоря в каком-нибудь из его проводников *1* наводится э. д. с., величина которой может быть определена по известной формуле

$$e_x = B_x \cdot l \cdot v \cdot 10^{-8} \text{ вольт}, \qquad (17,1)$$

здесь B_x — величина магнитной индукции в том месте междужелезного пространства, где находится в данный момент времени двигающийся проводник *1*; l — активная длина проводника в cm; v — окружная скорость якоря, выраженная в cm/sec.

Суммарную э. д. с., индуктированную в обмотке якоря, мы найдем, просуммировав э. д. с., индуктированные в проводах одной какой-нибудь параллельной ветви:

$$E = \Sigma e_x.$$

Имея в виду, что между двумя смежными разноименными щетками находится $\frac{N}{2a}$ проводов, соединенных последовательно, и предполагая, что эти провода равномерно распределены под полюсами, мы найдем, что на протяжении бесконечно малой части dx внешней окружности якоря расположатся $\frac{Ndx}{2a \cdot \tau}$ прово-

дов; суммарная э. д. с., индуктированная в этих проводах, будет равна

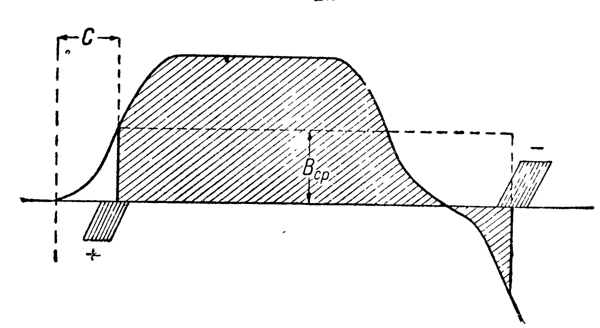
$$\frac{Ndx}{2a \cdot \tau} e_x = \frac{Ndx}{2a \cdot \tau} \cdot l \cdot v \cdot B_x \cdot 10^{-8} \text{ вольт};$$

э. д. с., индуктированная по одной ветви якоря, будет

$$E = \frac{N}{2a} \int \frac{e_x dx}{\tau} = \int_{x=0}^{x=\tau} \frac{Ndx}{2a \cdot \tau} \cdot l \cdot v \cdot B_x \cdot 10^{-8} = \frac{N}{2a} \cdot l \cdot v \cdot 10^{-8} \int_0^{\tau} \frac{B_x dx}{\tau};$$

в этом выражении $\int_0^{\tau} \frac{B_x dx}{\tau} = B_{cp}$ равно средней величине магнитной индукции в воздушном зазоре, поэтому

$$E = \frac{N}{2a} \cdot l \cdot v \cdot B_{cp} \cdot 10^{-8} \text{ вольт}.$$



Фиг. 63. Щетки смещены относительно нейтрали.

Подставляя в это уравнение выражение для окружной скорости $v = \frac{\pi \cdot D \cdot n}{60} = \frac{2 \cdot p \cdot \tau \cdot n}{60}$ (где D — внешний диаметр якоря в *cm* и n — число оборотов якоря в минуту), получим

$$E = \frac{N}{2a} \cdot l \cdot \frac{2p \cdot \tau \cdot n}{60} \cdot B_{cp} \cdot 10^{-8} \text{ вольт}.$$

Так как

$$\tau \cdot l \cdot B_{cp} = \Phi = \text{магнитному потоку},$$

то

$$E = \frac{p}{a} \cdot \frac{n}{60} \cdot N \cdot \Phi \cdot 10^{-8} \text{ вольт}. \quad (17,2)^{1}$$

На фиг. 62 щетки показаны расположенными в строго нейтральной зоне; если щетки смещены относительно нейтрали на величину C, то, как показывает фиг. 63, величина B_{cp} уменьшается, и в соответствии с этим должна также уменьшаться и э. д. с. якоря E; во избежание этого щетки должны располагаться по возможности ближе к нейтрали.

---

[1] Формула (17,2) представляет собой основное уравнение э. д. с., наводимой в динамомашине для всякого рода обмотки якоря.

Отношение $\frac{p}{a}$ является фактором, учитывающим характер обмотки.

В случае простой последовательной обмотки $a = 1$ и $\frac{p}{a} = p$; при параллельной (петлевой) обмотке $a = p$ и потому $\frac{p}{a} = 1$, и в последовательно параллельной обмотке отношение $\frac{p}{a}$ колеблется в пределах $\frac{p}{2}$ до 1.

§ 18. Выбор типа обмотки. Обратимся к выражению, дающему величину индуктированной э. д. с.

$$E = \frac{p}{a} \cdot \frac{n}{60} N \Phi 10^{-8} \text{ вольт.}$$

Из этого выражения можно найти число проводов якоря в одной ветви

$$\frac{N}{2a} = \frac{60 E}{n} \cdot \frac{1}{2p \Phi} \cdot 10^8. \quad (18,1)$$

На основании этого выражения можно сделать следующие выводы:

1. Для высоковольтных машин следует брать малое число параллельных разветвлений в якоре; при высоких напряжениях (E — велико) и тихоходных машинах (n — мало) приходится выбирать N — большое и a — малое, выбирая иногда даже $a = 1$.

2. Чем больше мощность машины, тем больше ее геометрические размеры (при том же n) и тем больше получается в выражении (18,1) произведение $2p\Phi$. Таким образом из уравнения (18,1) следует, что с возрастанием мощности происходит обычно уменьшение числа проводов в одной ветви $\frac{N}{2a}$.

В машинах большой мощности и большой быстроходности число проводов в одной ветви $\frac{N}{2a}$ может получиться настолько малым, что может оказаться иногда неизбежным применение петлевых многократно замкнутых обмоток, у которых число параллельных ветвей превосходит число полюсов.

ГЛАВА ТРЕТЬЯ

МАГНИТНАЯ ЦЕПЬ

§ 19. Общее понятие о расчете магнитной цепи динамомашины постоянного тока. На фиг. 64 показана половина станины четырехполюсной машины; как видно из этой фигуры, силовые линии потока, вызываемого катушками электромагнитов, проходят по железу якоря через воздушный зазор, внутри сердечников электромагнитов и станины.

При расчете магнитной цепи обыкновенно разбивают ее на ряд отдельных частей, причем приближенно предполагают, что для каждой из них поперечное сечение постоянно и м. д. с. тоже постоянна; тогда число ампервитков одной пары полюсов AW определится как сумма ампервитков, затрачиваемых на проведение магнитного потока через воздушный зазор (AW_l), через железо якоря (AW_a), через зубцы (AW_z), полюсные сердечники (AW_m) и станину (AW_j)

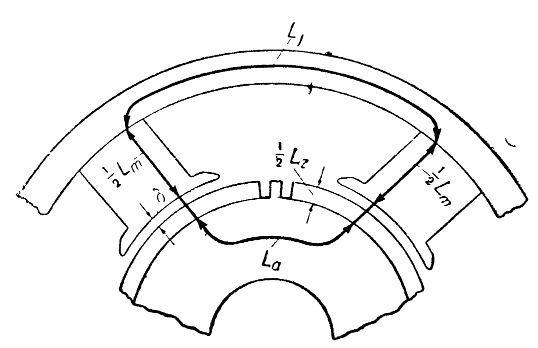
$$AW = AW_l + AW_z + AW_a + AW_m + AW_j.$$

Последнее равенство может быть еще выражено следующим образом

$$AW = aw_l \cdot 2\delta + aw_z L_z + aw_a L_a + aw_m L_m + aw_j L_j, \qquad (19,1)$$

где L_z, L_a, L_m, L_j представляют собой длины средних путей магнитных линий, получаемых путем соединения между собой центров тяжестей поперечных сечений отдельных участков цепи, и aw_l, aw_z, aw_a, aw_m и aw_j — соответствующие числа ампервитков на 1 cm длины.

Последняя величина (которая иногда еще носит название удельного числа ампервитков) может быть определена на основании кривых намагничивания при условии, что для данного участка магнитной цепи магнитная индукция известна.



Фиг. 64. Магнитная цепь четырехполюсной машины.

Кривые намагничивания дают зависимость между магнитной индукцией B и удельным числом ампервитков aw для данного сорта ферромагнитного вещества и определяются опытным путем. На фиг. 65 приведены кривые намагничивания различных сортов железа, чугуна и литой стали.

§ 20. Теоретическая полюсная дуга и длина якоря. Зная максимальную величину магнитной индукции в воздушном зазоре B_l, мы можем определить величину магнитного потока Φ; для этой цели нам необходимо еще знать две величины: так называемую расчетную длину полюсной дуги b_i и расчетную длину якоря l_i.

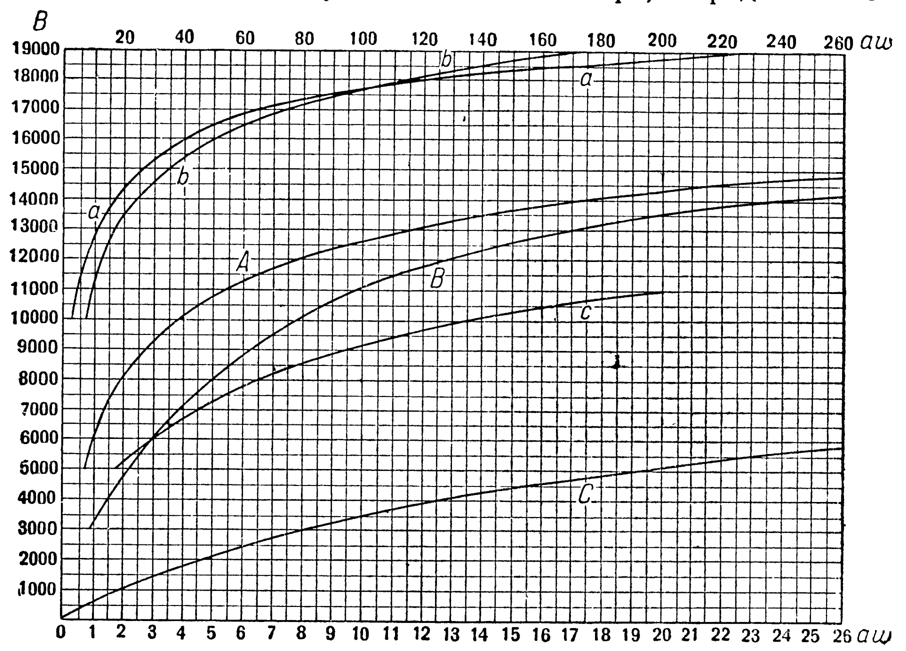
Понятие о расчетной длине полюсной дуги b_i мы можем получить из фиг. 66, на которой изображен полюсный наконечник и кривая распределения магнитной индукции B; для определения b_i необходимо определить площадь кривой B и построить равновеликий прямоугольник с высотой B_l; ширина основания этого прямоугольника и будет равна искомой величине b_i.

Очертания кривой B (фиг. 66) зависят от формы полюсного наконечника. Края полюсного наконечника обыкновенно делаются скошенными с целью получения хороших условий для коммутации (см. ниже) и получения бесшумного хода машины. При расчетах иногда можно приближенно принимать, что расчетная длина дуги равна длине действительной дуги: $b_i \approx b$.

Отношение между длиной дуги b и полюсным делением τ будем в дальнейшем называть коэфициентом магнитного перекрытия

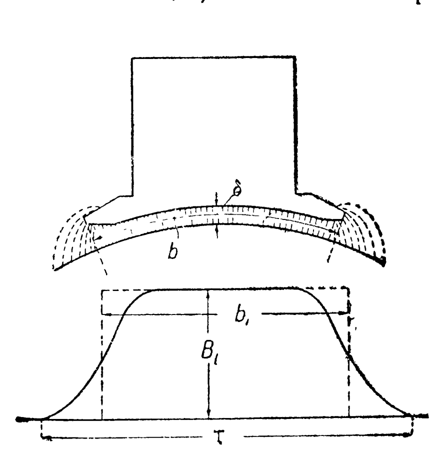
$$\alpha = \frac{b}{\tau}.$$

На фиг. 67 изображен разрез железа якоря и кривая распределения магнитной индукции вдоль оси якоря; определив пло-

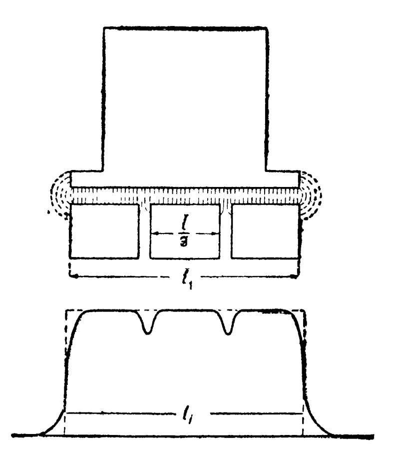


Фиг. 65. Кривые намагничивания:

A, *a* — кривые для якорного железа; *B*, *b* — кривые для стального литья; *C*,*c* — кривые для чугуна. Для *A*, *B*, *C* пользоваться нижними значениями для *aw*; для *a*, *b*, *c* пользоваться верхними значениями для *aw*.



Фиг. 66. Кривая распределения магнитной индукции вдоль выпрямленной окружности якоря.



Фиг. 67. Кривая распределения магнитной индукции в осевом направлении.

щадь этой кривой и построив равновеликий прямоугольник с высотой B_l, мы найдем длину основания этого прямоугольника l_i,

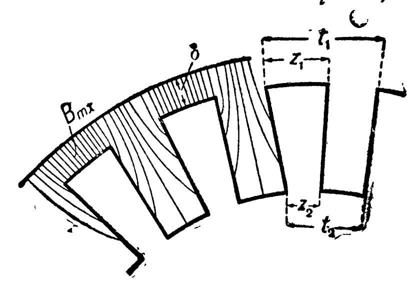
которую в дальнейшем будем называть теоретической или расчетной длиной якоря. При расчетах иногда можно приближенно принять, что теоретическая длина якоря l_i равна действительной длине железа якоря l (за вычетом ширины вентиляционных каналов): $l_i \approx l$.

Таким образом, зная величину максимальной магнитной индукции в междужелезном пространстве B_l, мы можем найти величину магнитного потока одного полюса

$$\Phi = b_i \cdot l_i \cdot B_l \text{ или } \Phi \approx b \cdot l \cdot B_l.$$

§ 21. Вычисление ампервитков для воздушного зазора (AW_l). Для того чтобы провести дважды магнитный поток через воздушный зазор δ гладкого якоря, необходимо следующее число ампервитков:

$$AW_l = 0{,}8 \cdot B_l \cdot 2\delta = 1{,}6 \cdot \delta \cdot B_l. \qquad (21{,}1)$$



Фиг. 68. Картина распределения магнитной индукции в воздушном зазоре в пазах якоря.

Для зубчатых якорей эта формула не применима, так как дает слишком малые значения для AW_l; причина этого заключается в том, что благодаря наличности зубцов в воздушном зазоре получаются местные сгущения силовых линий, и у вершин зубцов магнитная индукция B_{mx} превосходит ее среднюю величину B_l (фиг. 68).

Обозначив отношение между максимальной и средней индукцией в воздухе через $k_1 = \frac{B_{mx}}{B_l}$, мы можем написать для зубчатого якоря

$$AW_l = 1{,}6 \cdot \delta \cdot B_{mx} = 1{,}6 \cdot k_1 \cdot \delta \cdot B_l. \qquad (21{,}2)$$

Одним из первых Картер (Carter) ввел в формулы для расчета воздушных ампервитков коэфициент k_1.

Поэтому коэфициент k_1 часто носит название коэфициента Картера.

Коэфициент k_1, входящий в последнее выражение, можно вычислить по одной из следующих эмпирических формул проф. Осанны:

$$k_1 = \frac{t_1 + 8\delta}{z_1 + 8\delta} \qquad (21{,}3)$$

или

$$k_1 = \frac{t_1 + 10\delta}{z_1 + 10\delta}, \qquad (21{,}3')$$

где t_1 — зубцовое деление у вершины зубца и z_1 — ширина вершины зубца (фиг. 68). Произведение $k_1 \cdot \delta = \delta'$ можно назвать расчетной величиной воздушного зазора.

При подсчете коэфициента Картера k_1 можно вместо формулы Осанны пользоваться также другой формулой, которую

приводит в своей книге Рихтер[1] и которая имеет следующий вид:

$$k_1 = \frac{t_1}{t_1 + \delta - \frac{3}{4} s}. \qquad (21,4)$$

В этой формуле s — ширина прореза полузакрытого паза (фиг. 68а).

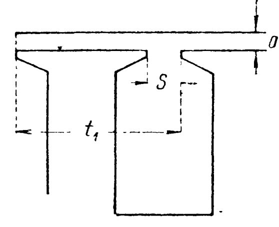
§ 22. Вычисление зубцовых ампервитков (AW_z). При расчете зубцовых ампервитков необходимо различать два случая: случай малых магнитных насыщений зубцов ($B_z < 18\,000$) и случай больших насыщений ($B_z > 18\,000$).

1-й случай ($B_z < 18\,000$). Магнитные силовые линии, вступая из полюсного наконечника в зубец, устанавливают в нем магнитные индукции: максимальную — у основания зубца ($B_{z\,max}$) и минимальную — у его вершины ($B_{z\,min}$).

Найдем величину магнитного потока, выходящего из полюсного наконечника на протяжении зубцового деления t_1 у вершины зубца:

$$\Phi_t = B_l \cdot l_i \cdot t_1,$$

или $\Phi_t \approx B_l \cdot l \cdot t_1$, так как согласно сказанному выше можно принять $l_i \approx l$ (фиг. 67).



Фиг. 68а.

Магнитный поток Φ_t, входя в зубец, устанавливает в каком-нибудь сечении зубца магнитную индукцию B_z; площадь этого сечения будет $l \cdot z \cdot k_2$, где l — длина железа якоря, z — ширина зубца в рассматриваемом месте и k_2 — коэфициент изоляции, предусматривающий бумажную изоляцию между листами железа; [$100(1 - k_2)$ дает объем изоляции в процентах по отношению к общему объему; за среднюю величину k_2 можно принять 0,90].

Таким образом мы можем написать

$$B_l \cdot l \cdot t_1 = B_z \cdot l \cdot z \cdot k_2,$$

откуда

$$B_z = B_l \frac{t_1}{k_2 \cdot z}. \qquad (22,1)$$

Применяя последнюю формулу, найдем магнитные индукции в максимальном и минимальном сечении зубца

$$B_{z\,min} = \frac{B_l \cdot t_1}{k_2 \cdot z_1}; \qquad (22,2)$$

$$B_{z\,max} = \frac{B_l \cdot t_1}{k_2 \cdot z_2}. \qquad (22,3)$$

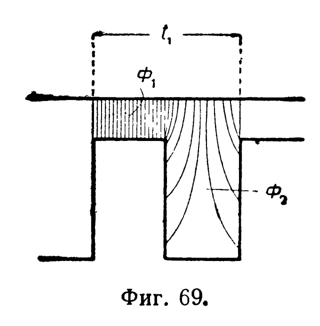
[1] См. Рихтер, Электрические машины, т. I.

По этим индукциям необходимо найти по кривой намагничивания соответственные значения удельных ампервитков $aw_{\min}$ и $aw_{\max}$; тогда получим

$$AW_z = L_z \left(\frac{aw_{\max} + aw_{\min}}{2}\right). \qquad (22,4)$$

2-й случай ($B_z > 18\,000$). При больших магнитных насыщениях формулы (22,2) и (22,3) приводят к неверным результатам: получаются магнитные индукции больше действительных.

Причина этого заключается в том, что зубец и рядом находящийся паз в магнитном отношении как бы соединены параллельно; магнитный поток Φ_t, выходящий из полюсного наконечника на протяжении зубцового деления t_1, разветвляется на две части: одна часть магнитного потока Φ_1 входит в зубец, и другая часть Φ_2 входит в рядом лежащий паз (фиг. 69):



Фиг. 69.

$$\Phi_t = \Phi_1 + \Phi_2; \qquad (22,5)$$

таким образом мы видим, что паз в магнитном отношении разгружает рядом лежащий зубец.

При расчете ампервитков для каждого сечения зубца мы будем различать две величины: магнитную индукцию B_{zi}, которая получилась бы, если бы все магнитные линии проходили сквозь железо зубцов, а в пазах магнитный поток отсутствовал бы, и магнитную индукцию B_{zd}, которая получится, если принять в расчет, что магнитный поток проходит через зубцы и пазы.

B_{zi} будем в дальнейшем называть теоретической индукцие и B_{zd} — действительной индукцией.

Для того чтобы найти связь между B_{zi} и B_{zd}, разделим уравнение (22,5) на величину

$$F_1 = l \cdot z \cdot k_2,$$

которая представляет собой площадь сечения зубца в рассматриваемом месте

$$\frac{\Phi_t}{F_1} = \frac{\Phi_1}{F_1} + \frac{\Phi_2}{F_1};$$

умножив и разделив второй член правой части на F_2, мы можем последнее уравнение еще переписать так:

$$\frac{\Phi_t}{F_1} = \frac{\Phi_1}{F_1} + \frac{\Phi_2}{F_2} \cdot \frac{F_2}{F_1},$$

где $F_2 = l_1 \cdot t - k_2 \cdot z \cdot l$ представляет собой площадь сечения воздуха

Принимая во внимание, что $\frac{\Phi_t}{F_1} = B_{zi}$, $\frac{\Phi_1}{F_1} = B_{zd}$ и $\frac{\Phi_2}{F_2} = H$ — напряжение магнитного поля, получим

$$B_{zi} = B_{zd} + H \left(\frac{F_2}{F_1}\right). \qquad (22,6)$$

Обозначим отношение площади сечения воздуха к площади сечения зубца через k_3:

$$k_3 = \frac{F_2}{F_1} = \frac{l_1 \cdot t - k_2 \cdot z \cdot l}{k_2 \cdot z \cdot l}. \qquad (22,7)$$

Подставляя (22,6) в (22,7), получим

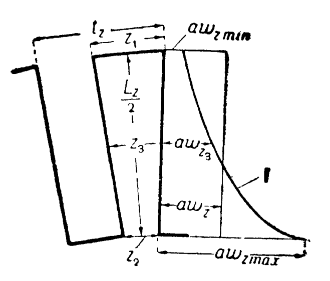
$$B_{zi} = B_{zd} + k_3 H;$$

так как $H = \frac{aw_z}{0,8} = 1,25\ aw_z$, то последнее уравнение можно переписать так:

$$B_{zi} = B_{zd} + 1,25\ k_3 aw_z. \qquad (22,8)$$

Полученное нами одно уравнение с двумя неизвестными (B_{zd} и aw_z) не дает еще возможности решить задачу. Найти B_{zd} мы можем, пользуясь методом последовательных приближений.

Для этой цели по формуле (22,1) находим B_{zi}; по кривой намагничивания находим соответственную величину aw_z, подставляем ее в уравнение (22,8) и находим B'_{zd} в первом приближении; зная B'_{zd}, находим соответственное aw_z'', которое вторично подставляем в уравнение (22,8), после чего определится более точно величина B''_{zd} во втором приближении и т. д.



Фиг. 70. Кривая ампервитков в зубце.

Так как площадь сечения зубца имеет в разных местах разную величину, то необходимо определить B_{zd} в нескольких сечениях.

Обыкновенно достаточно бывает ограничиться определением магнитной индукции у вершины зубца ($B_{zd\,\min}$), в середине (B_{zd3}) и у основания ($B_{zd\,\max}$); на основании последних величин можно найти соответственные величины $aw_{\min}$, aw_3 и $aw_{\max}$; при больших насыщениях aw_3 уже не равна полусумме $aw_{\min}$ и $aw_{\max}$, в чем можно убедиться, построив кривую зависимости между высотой зубца и aw_z (фиг. 70).

Спланиметрировав полученную таким образом кривую и построив равновеликий прямоугольник, мы можем найти среднюю расчетную величину aw_z; тогда $AW_z = aw_z \cdot L_z$.

Так как кривая I на фиг. 70 по своей форме приближается к параболе, то, применяя приближенный метод Симпсона (Simpson), мы можем найти аналитически среднюю ординату:

$$aw_z = \frac{aw_{\min} + 4aw_3 + aw_{\max}}{6}. \qquad (22,9)$$

Пример. Дано: $B_{zi} = 23\,000$; $k_3 = 1,2$. По формуле (22,8) находим

$$23\,000 = B_{zd} + 1,25 \cdot 1,2\ aw_z.$$

По кривой намагничивания находим для 23 000 удельное число ампервитков $aw_z = 2\,000$; следовательно,

$$23\,000 = B_{zd} + 1,25 \cdot 1,2 \cdot 2\,000,$$

откуда

$$B'_{zd} = 23\,000 - 1{,}25 \cdot 1{,}2 \cdot 2\,000 = 23\,000 - 3\,000 = 20\,000$$

(первое приближение).

По кривой намагничивания для $B'_{zd} = 20\,000$ находим $aw_z' = 300$; подставляя это значение в уравнение (22,8), получаем

$$B''_{zd} = 23000 - 1{,}25 \cdot 1{,}2 \cdot 300 = 23\,000 - 450 = 22\,550$$

(второе приближение).

По кривой намагничивания для $B''_{zd} = 22\,550$ находим $aw''_z = 1\,600$, следовательно,

$$B'''_{zd} = 23\,000 - 1{,}25 \cdot 1{,}2 \cdot 1\,600 = 23\,000 - 2\,400 \approx 20\,600$$

(третье приближение).

Точно таким же образом можно найти

$$B^{IV}_{zd} = 22\,000,$$

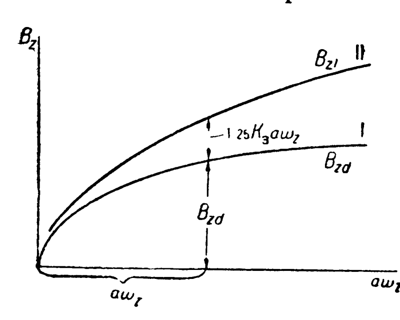
(четвертое приближение) и

$$B^{V}_{zd} = 21\,950$$

(пятое приближение).

Последнюю величину можно считать окончательной.

§ 23. Кривые для расчета зубцовых ампервитков. Следующее графическое построение дает возможность более скорого определения действительной магнитной индукции B_{zd}, если известна величина теоретической индукции B_{zi}.[1]



Фиг. 71. Кривые зависимости между B_{zi}, B_{zd} и aw_z.

На фиг. 71 показана кривая *I* зависимости между B_{zd} и aw_z (кривая намагничивания); для какой-нибудь точки этой кривой (aw_z, B_{zd}) определяется величина $1{,}25 \cdot k_3 \cdot aw_z$; складывая последнюю с B_{zd}, мы получим согласно уравнению (22,8) величину B_{zi} для данной точки.

Выполняя такое же построение для ряда других точек, получим кривую *II*, дающую зависимость между aw_z и B_{zi} для данного коэфициента k_3.

На фиг. 72 показан ряд кривых, дающих зависимость между B_{zi} и aw_z для разных коэфициентов k_3.

Пример. Дано $B_{zi} = 24\,000$; $k_3 = 2$.

Через точку начальной ординаты, соответствующую $B_{zi} = 24\,000$, проводим горизонталь до пересечения с кривой $k_3 = 2$; из точки пересечения с последней кривой проводим вертикаль и находим соответственную абсциссу $aw_z = 950$; последней абсциссе на кривой B_{zd} соответствует $B_{zd} = 21\,500$.

§ 24. Ампервитки для сердечника якоря (AW_a). Действительное сечение железа сердечника якоря будет

$$Q_a = l \cdot h \cdot k_2,$$

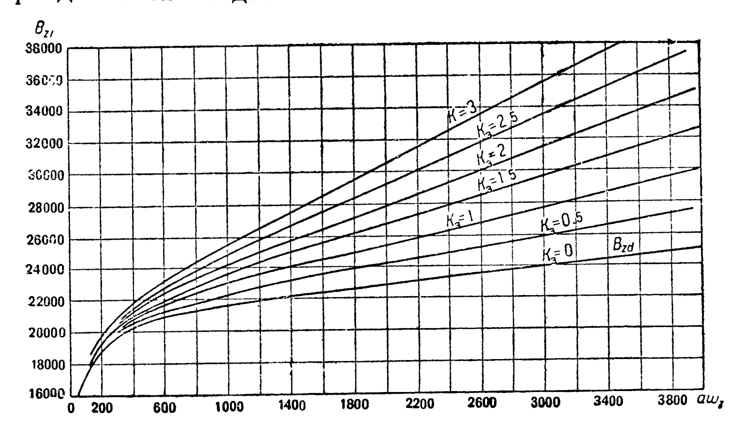
где h — высота железа якоря (фиг. 73).

[1] См. Арнольд, т. I.

Магнитная индукция в железе якоря определится

$$B_a = \frac{\Phi}{2Q_a} = \frac{\Phi}{2 \cdot l \cdot h \cdot k_2}. \qquad (24,1)$$

В знаменатель этого уравнения входит 2, так как магнитный поток по выходе из полюса и вступая в железо якоря затем в нем разделяется на две части.



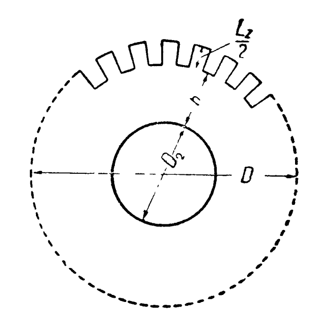
Фиг. 72. Кривые для определения B_{zd} по B_{zi} и aw_z.

Определив по кривой намагничивания удельное число ампервитков aw_a, получим

$$AW_a = aw_a \cdot L_a.$$

На самом деле, магнитный поток, пронизывающий якорь, не распределен равномерно по всему сечению Q_a, а более сгущен в той части его, которая ближе расположена к основанию зубцов. Поэтому число ампервитков, потребных для проведения магнитного потока через сердечник якоря, будет больше того числа, которое мы получили при сделанном нами допущении.

Считаясь, однако, с тем, что ампервитки якоря AW_a в машине нормального типа составляют лишь незначительную долю того числа ампервитков AW, которые необходимы для проведения магнитного потока через всю магнитную цепь машины, можно без ощутительной погрешности при подсчете принимать, что поток, пронизывающий якорь, равномерно распределен по его полезному сечению $2Q_a$.



Фиг. 73. Железо якоря.

§ 25. Число ампервитков для магнитов и ярма (AW_m и AW_i). Магнитный поток Φ_m в электромагнитах имеет величину бо́льшую, чем магнитный поток Φ, вступающий в якорь, на величину магнитного потока рассеяния, силовые линии которого замыкаются помимо сердечника якоря.

Отношение всего потока (в сердечниках магнитов и ярме) Φ_m к полезной его части Φ, проходящей через сердечник якоря, назовем коэфициентом магнитного рассеяния σ:

$$\sigma = \frac{\Phi_m}{\Phi} = \frac{\Phi + \Phi_s}{\Phi},$$

где Φ_s — так называемый поток утечки.

Коэфициент магнитного рассеяния σ зависит от формы электромагнитов, от насыщения железа и величины междужелезного пространства; он может быть с достаточной для практики точностью вычислен для простейших форм электромагнитов.

Зная коэфициент σ, мы можем вычислить магнитную индукцию в сердечниках электромагнитов

$$B_m = \frac{\sigma \cdot \Phi}{Q_m},$$

где Q_m — площадь сечения сердечника; магнитная индукция в станине будет

$$B_j = \frac{\sigma\Phi}{2Q_j}$$

(фиг. 64),[1] где Q_j — площадь сечения станины.

Таким образом

$$AW_m = aw_m \cdot L_m,$$
$$AW_j = aw_j \cdot L_j.$$

§ 26. Расчет магнитного рассеяния. Силовые линии рассеянного поля замыкаются помимо якоря через воздушное пространство между разноименными смежными полюсами. Этот поток рассеяния Φ_s для удобства расчета разделим на следующие частичные потоки утечки:

1) поток утечки между внутренними краями полюсных наконечников; этот поток Φ_1 состоит из двух ветвей: каждый из двух внутренних краев наконечника дает по $\frac{1}{2}\Phi_1$ рассеянных линий (фиг. 74).

2) поток утечки между боковыми краями полюсного наконечника; этот поток Φ_2 состоит из четырех ветвей, причем каждому боковому краю соответствует $\frac{1}{4}\Phi_2 + \frac{1}{4}\Phi_2$ силовых линий (фиг. 74);

3) поток утечки между внутренними сторонами сердечников полюсов; этот поток Φ_3 состоит из двух ветвей;

4) поток утечки между боковыми сторонами сердечников полюсов Φ_4 состоит из четырех ветвей.

Каждый из перечисленных здесь потоков утечки может быть вычислен путем перемножения соответственной разности магнитных потенциалов P_m и „магнитной проводимости" между

[1] В знаменателе двойка по той причине, что поток $\sigma\Phi$, вступающий из магнитного сердечника в станину, при условии симметричности магнитной цепи (на практике к этому условию всегда стремятся) разветвляется на две равные части, причем площадь сечения станины Q_j пронизывает только половинный поток $\frac{\sigma\Phi}{2}$.

соответственными поверхностями рассеяния. Таким образом можно найти:

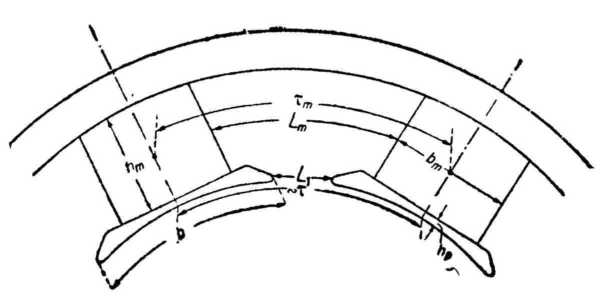
I. Поток утечки между внутренними поверхностями полюсных башмаков. Разность магнитных потенциалов между полюсными башмаками

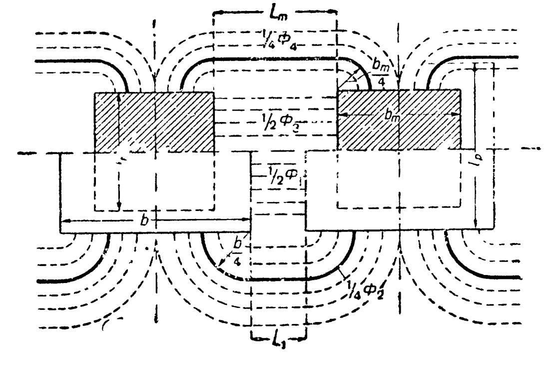
$$P_m = \frac{AW_l + AW_z + AW_a}{0{,}8} = \frac{AW'}{0{,}8}.$$

Магнитная проводимость этого потока, имеющего две ветви, будет

$$\Lambda_1 = 2\left[\frac{l_p \cdot h_p}{L_1}\right],$$

где l_p — осевая длина полюсного башмака, h_p — его радиальная высота и L_1 — расстояние между внутренними краями полюсных наконечников; если h_p — непостоянная величина по всей внешней поверхности полюсного наконечника, то следует взять ее среднее значение.





Фиг. 74. Поток утечки.

Так как согласно фиг. 74

$$L_1 \approx \tau - b \approx \tau(1 - \alpha),$$

то мы выражение для Λ_1 можем еще переписать так:

$$\Lambda_1 = \frac{2l_p \cdot h_p}{\tau - b} = \frac{2l_p \cdot h_p}{\tau(1 - \alpha)}. \qquad (26,1)$$

Таким образом мы имеем

$$\Phi_1 = P_m \Lambda_1 = \frac{AW' \cdot 2 \cdot l_p \cdot h_p}{0{,}8(\tau - b)} = \frac{AW' \cdot 2l_p \cdot h_p}{0{,}8 \cdot \tau(1 - \alpha)},$$

где AW' — число ампервитков, приходящееся на пару полюсов (за вычетом ампервитков на ярмо и полюсные сердечники).

II. Поток утечки между внешними поверхностями полюсных наконечников

$$\Phi_2 = P_m \Lambda_2.$$

Можно принять приближенно, что средняя силовая линия потока $^1/_4\Phi_2$ (фиг. 74) состоит из отрезка прямой длиной L_1 и двух четвертей окружности радиуса $\frac{b}{4}$; поверхность рассеяния

одной ветви этого потока будет $\frac{b}{2} \cdot h_p$; таким образом магнитная проводимость всего потока, имеющего четыре ветви, будет

$$\Lambda_2 = 4 \left[\frac{\frac{b}{2} \cdot h_p}{L_1 + \frac{\pi b}{4}} \right].$$

Подставляя в знаменатель этого выражения

$$L_1 \approx \tau (1 - \alpha) \text{ и } b = \alpha \cdot \tau,$$

получим

$$\Lambda_2 = \frac{2b \cdot h_p}{\tau \left(1 - \alpha + \frac{\pi}{4} \cdot \alpha\right)} \approx \frac{2b \cdot h_p}{\tau (1 - 0{,}21\, \alpha)}. \qquad (26{,}1')$$

III. Поток утечки между внутренними поверхностями полюсных сердечников. Так как разность магнитных потенциалов между поверхностями сердечников меняется от 0 до P_m пропорционально возрастанию высоты сердечника, то мы вводим в расчет среднюю величину $^1/_2\, P_m$; таким образом

$$\Phi_3 = {}^1/_2 \cdot P_m \cdot \Lambda_3,$$

где

$$\Lambda_3 = 2 \left[\frac{l_m \cdot h_m}{L_m} \right].$$

Здесь l_m — аксиальная длина полюсного сердечника, h_m — его высота и L_m — среднее расстояние между внутренними поверхностями (фиг. 74).

По аналогии с формулой (26,1) мы можем написать

$$\Lambda_3 = \frac{2 l_m \cdot h_m}{\tau_m (1 - \alpha_m)}, \qquad (26{,}2)$$

где τ_m — полюсное деление, отнесенное к окружности, проходящей через середину высоты полюсных сердечников (фиг. 74), и

$$\alpha_m = \frac{b_m}{\tau_m}.$$

IV. Поток утечки между внешними поверхностями сердечников

$$\Phi_4 = \frac{1}{2} P_m \cdot \Lambda_4,$$

где

$$\Lambda_4 = 4 \left[\frac{\frac{b_m}{2} \cdot h_m}{L_m + \frac{\pi b_m}{4}} \right],[1]$$

b_m — ширина полюсного сердечника.

---

[1] В данном случае, как и при определении Λ_2, мы среднюю силовую линию потока $^1/_4 \Phi_4$ представляем себе состоящей из отрезка прямой длиной L_m и двух четвертей окружности радиуса $\frac{b_m}{4}$.

По аналогии с формулой (26,1′) мы можем написать:

$$\Lambda_4 = \frac{2\,b_m \cdot h_m}{\tau_m(1 - 0{,}21\alpha_m)}. \qquad (26{,}3)$$

Таким образом весь поток рассеяния одного полюса определится как сумма

$$\Phi_s = P_m\left[\frac{2\,l_p \cdot h_p}{\tau(1-\alpha)} + \frac{2\,b \cdot h_p}{\tau(1-0{,}21\,\alpha)}\right] + \frac{P_m}{2}\left[\frac{2\,l_m \cdot h_m}{\tau_m(1-\alpha_m)} + \frac{2\,b_m \cdot h_m}{\tau_m(1-0{,}21\,\alpha_m)}\right]. \quad (26{,}4)$$

Последнее равенство можно еще переписать так:

$$\Phi_s = P_m\left[\frac{2h_p \cdot l_p'}{\tau(1-\alpha)} + \frac{h_m \cdot l_m'}{\tau_m(1-\alpha_m)}\right]$$

или

$$\Phi_s = P_m\left[\frac{2\,h_p \cdot l_p'}{L_1} + \frac{h_m \cdot l_m'}{L_m}\right], \qquad (26{,}5)$$

где $l_p' = l_p + b\frac{1-\alpha}{1-0{,}21}$ есть приведенная длина полюсного наконечника и $l_m' = l_m + b_m\frac{1-\alpha_m}{1-0{,}21\,\alpha_m}$ — приведенная осевая длина сердечника.

Приближенно в среднем можно принять, что:

$$l_p' = l_p + 0{,}4\ b \qquad (26{,}6)^1$$

и

$$l_m' = l_m + 0{,}8\ b_m. \qquad (26{,}7)^1$$

При пользовании формулой (26,5) мы определяем в сущности магнитное рассеяние между внутренними поверхностями полюсных наконечников и сердечников, боковое же магнитное рассеяние мы учитываем тем, что в расчет вводим не действительные длины l_p и l_m, а увеличенные l_p' и l_m'.

Формулы (26,4) и (26,5) относятся к случаю прямоугольных сердечников. При круглых сердечниках мы заменяем их квадратными того же сечения; если диаметр круглого сердечника d_m, то сторона квадрата d_q определится из соотношения

$$\frac{\pi d_m^2}{4} = d_q^2,$$

откуда

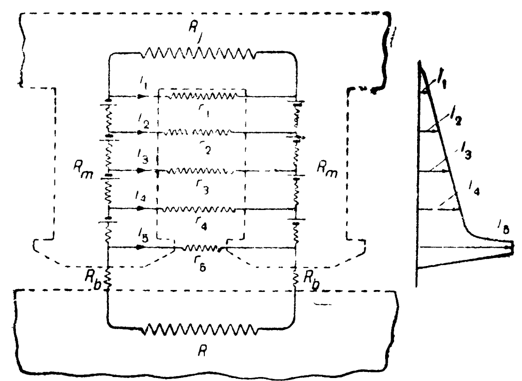
$$d_q = \frac{d_m}{2}\sqrt{\pi}.$$

В заключение главы о теоретическом подсчете коэфициента магнитного рассеяния σ не мешало бы указать на то, что полученный нами конечный результат в виде формулы (26,5) все же не дает возможности совершенно точно определить коэфициент σ. Причина этого, главным образом, кроется в том, что поле потока

[1] Формулы (26,6) и (26,7) получены в предположении, что $\alpha = 0{,}65$ и $\alpha_m = 0{,}24$.

утечки не имеет одинаковой густоты в разных точках, и потому, строго говоря, силовая линия, проходящая через центр тяжести рассматриваемой поверхности утечки, не будет совпадать с действительной средней силовой линией соответственного поля потока рассеяния; кроме того, траектории отдельных силовых линий имеют весьма сложный вид, и, исходя из этого, легко догадаться, что траектория средней силовой линии также будет отступать от той, которая нами положена в основу расчета.

Введение всех этих тонкостей, частично не поддающихся аналитическому определению, чрезвычайно усложнило бы вид уравнения коэфициента σ.



Фиг. 75. Электрическая схема, иллюстрирующая явление магнитной утечки.

Можно, однако, указать на то, что формула (26,5) дает практически весьма хорошие результаты и что полученное посредством нее расчетное значение для σ будет тем ближе к действительному значению его, чем больше полюсов содержит машина, т. е. чем она многополюсней, ибо в последнем случае силовые линии будут менее искривлены, и путь средней силовой линии будет ближе подходить к тому, который нами принят при определении отдельных „магнитных проводимостей“ между соответственными поверхностями рассеяния.

В заключение приведем эквивалентную электрическую схему, иллюстрирующую явление магнитного рассеяния (фиг. 75). R_m, R_j, R_a и R_b на фиг. 75 изображают электрические сопротивления, эквивалентные соответствующим магнитным сопротивлениям: в полюсных сердечниках, ярме, железе якоря и воздушном зазоре. Электрические сопротивления $r_1, r_2, \ldots, r_5$ на этой же схеме изображают магнитные сопротивления потоков утечки между внутренними поверхностями полюсов и включенные последовательно электрические элементы изображают те м. д. с., которые создаются обмотками возбуждения. Помещенная справа на этом чертеже диаграмма токов i_1, $i_2 \ldots$ дает примерное представление о характере изменения той магнитной индукции, которая устанавливается в междуполюсном пространстве потоком рассеяния.

§ 27. Формулы для приближенного расчета σ. Во многих случаях при определении σ можно пользоваться приближенными эмпирическими формулами. Очень удобными в этом отношении являются формулы Гобарта (Hobart) и Эллиса (Ellis):

$$\Phi_s = C \cdot \frac{h \cdot l_m}{L_m} \cdot AW_1 \qquad (27,1)$$

и

$$\Phi_s = C \cdot \frac{h\,(l_m + 15)}{L_m} \cdot AW_1. \qquad (27,2)$$

Формула (27,1) относится к полюсам круглого сечения, а (27,2) — к полюсам прямоугольного сечения; h — высота полюса (включая высоту башмака); AW_1 — число ампервитков на один полюс; C — эмпирический коэфициент для того случая, если длины выражены в cm, колеблющийся от $C = 2{,}5$ до $C = 3{,}5$.

Формула автора этой книги для расчета потока рассеяния имеет такой вид:

$$\Phi_s = (C_1 \cdot \tau + C_2 \cdot l)\,AW_1, \qquad (27,3)^{1}$$

где l — осевая длина якоря.

Эмпирические коэфициенты в среднем могут быть приняты:

$$C_1 = 1{,}5 - 1{,}8$$

и

$$C_2 = 0{,}7 - 1{,}2.$$

Если число ампервитков на один полюс AW_1 неизвестно, то можно пользоваться другой формулой автора

$$\sigma = 1 + \delta\left(\frac{C_1}{\tau} + \frac{C_2}{l}\right), \qquad (27,4)^{1}$$

где константы имеют в среднем следующее значение:

$$C_1 = 4 - 5;$$
$$C_2 = 2 - 3.$$

Пример. Необходимо определить коэфициент магнитного рассеяния динамомашины, если известно, что

$$AW_l = 7\,500;\ AW_z = 350;\ AW_a = 60;\ AW_m = 425;\ AW_j = 3\,100.$$

Средняя радиальная высота полюсного наконечника $h_p = 2$ cm.
Осевая длина полюсного наконечника $l_p = 21{,}5$ cm.
Длина пути полюсного наконечника $b = 21$ cm.
Полюсное деление $\tau = 27{,}5$ cm.
Коэфициент магнитного перекрытия $\alpha = \frac{b}{\tau} = \frac{21}{27{,}5} = 0{,}77$.
Магнитные сердечники круглые, диаметр их $d_m = 20$ cm.
Полюсное деление, отнесенное к окружности, проходящей через середины высот полюсных сердечников, $\tau_m = 43$ cm
Расстояние между концами полюсных наконечников двух соседних полюсов $L_1 = \tau - b = 27{,}5 - 21 = 6{,}5$ cm.
Высота полюса, включая высоту башмака, $h = 17$ cm.
Длина якоря (за вычетом вентиляционных каналов) $l = 19{,}5$ cm.
Высота полюсного сердечника $h_m = 15$ cm.
Длина междужелезного пространства $\delta = 0{,}5$ cm.
Полезный магнитный поток при полной нагрузке машины $\Phi = 3{,}2 \cdot 10^6$.

---

[1] Формулы (27,3) и (27,4) справедливы для машин без добавочных полюсов. При наличности добавочных полюсов коэфициент σ, получаемый из этих формул, необходимо помножить на некоторый поправочный коэфициент, учитывающий увеличение магнитного потока рассеяния благодаря наличности добавочных полюсов; этот поправочный коэфициент на основании экспериментальных данных можно принять в среднем равным 1,05—1,08.

Найдем коэфициент σ, пользуясь уравнением (26,5):

$$\Phi_s = P_m \left[\frac{2h_p \cdot l_p'}{L_1} + \frac{h_m \cdot l_m'}{L_m}\right],$$

где

$$P_m = \frac{AW_l + AW_z + AW_a}{0,8} = \frac{7\,500 + 350 + 60}{0,8} = 9\,850.$$

Так как уравнение (26,5) выведено для случая прямоугольных полюсных сердечников, а у нас круглые, то приходится данные полюсные сердечники заменить эквивалентными квадратного сечения, сторона которого d_q:

$$d_q = \frac{d_m}{2}\sqrt{\pi} + \frac{20}{2}\sqrt{\pi} = 17,7 \text{ cm}.$$

Следовательно, в данном частном случае имеем, что длина и ширина полюсных сердечников равны

$$b_m = l_m = 17,7 \text{ cm}.$$

Приведенная длина полюсного наконечника

$$l_p' = l_p + b \, \frac{1-\alpha}{1-0,21\,\alpha} = 21,5 + 21\,\frac{1-0,77}{1-0,21 \cdot 0,77} = 24,7 \text{ cm}.$$

Приведенная осевая длина сердечника

$$l_m' = l_m + b_m \, \frac{1-\alpha_m}{1-0,21\,\alpha_m} = 17,7 + 17,7\,\frac{1-0,415}{1-0,21 \cdot 0,415} = 29 \text{ cm},$$

где

$$\alpha_m = \frac{b_m}{\tau_m} + \frac{17,7}{43} = 0,415,$$

так что

$$\Phi_s = 9\,850\left[\frac{2 \cdot 2 \cdot 27,4}{6,5} + \frac{15 \cdot 29}{25,3}\right] = 370\,000,$$

где

$$L_m = \tau_m - b_m = 43 - 17,7 = 25,3 \text{ cm}.$$

Магнитный поток в сердечниках и станине

$$\Phi_m = \Phi + \Phi_s = 32 \cdot 10^5 + 3,7 \cdot 10^5 = 35,7 \cdot 10^5;$$

коэфициент магнитного рассеяния

$$\sigma = \frac{\Phi_m}{\Phi} = \frac{3,57 \cdot 10^6}{3,2 \cdot 10^6} = 1,1.$$

Проверим для заданной магнитной цепи коэфициент σ по эмпирическим формулам (27,1), (27,3) и (27,4) и сличим полученные результаты.

По Гобарту и Эллису (27,1) для круглых сердечников

$$\Phi_s = C\,\frac{h \cdot l_m}{L_m}\,AW_1.$$

Коэфициент C берем средний, т. е. $C = 3$.

$$AW_1 = \frac{AW_l + AW_z + AW_a + AW_m + AW_j}{2} =$$

$$= \frac{7\,500 + 350 + 60 + 425 + 3\,100}{2} = 5\,715,$$

откуда

$$\Phi_s = 3\,\frac{17 \cdot 17,7}{25,3} \cdot 5\,715 = 2,05 \cdot 10^5$$

и

$$\sigma = \frac{\Phi + \Phi_s}{\Phi} = \frac{32 \cdot 10^5 + 2,05 \cdot 10^5}{32 \cdot 10^5} = 1,068.$$

По формуле автора (27,3)

$$\Phi_s = (C_1\tau + C_2 l)\, AW_1.$$

Коэфициенты берем средние

$$C_1 = 1{,}7 \text{ и } C_2 = 0{,}9,$$

следовательно,

$$\Phi_s = (1{,}7\cdot 27{,}5 + 0{,}9\cdot 19{,}5)\cdot 5\,715 = 3\cdot 77\cdot 10^5$$

и

$$\sigma = \frac{\Phi_s + \Phi}{\Phi} = \frac{3{,}77\cdot 10^{\circ} + 32\cdot 10^5}{32\cdot 10^5} = 1{,}12.$$

По формуле автора (27,4)

$$\sigma = 1 + \delta\left(\frac{C_1}{\tau} + \frac{C_2}{l}\right)$$

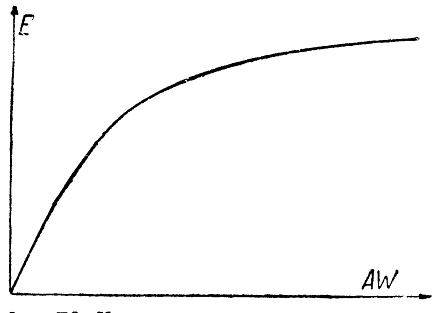
берем

$$C_1 = 4{,}5 \text{ и } C_2 = 2{,}5,$$

так что

$$\sigma = 1 + 0{,}5\left(\frac{4{,}5}{27{,}5} + \frac{2{,}5}{19{,}5}\right) = 1{,}105.$$

§ 28. Характеристика холостого хода. Задаваясь разными величинами магнитного потока и пользуясь указанным выше методом, мы можем найти числа ампервитков AW, соответствующие каждому магнитному потоку Φ.



Фиг. 76. Характеристика холостого хода.

Зависимость между AW и Φ, построенная в прямоугольных координатах (фиг. 76), носит название кривой намагничивания, или характеристики холостого хода; по осям ординат этой кривой часто откладывают не Φ, а пропорциональную ей величину E.

ГЛАВА ЧЕТВЕРТАЯ

РЕАКЦИЯ ЯКОРЯ

§ 29. Реакция якоря при щетках, расположенных в геометрической нейтральной зоне. На фиг. 62 мы видели кривую распределения магнитной индукции в междужелезном пространстве вдоль окружности якоря. Такой симметричный вид эта кривая принимает только в том случае, когда ток в якоре равен нулю; эта кривая теряет свою симметричную форму, когда по обмотке якоря течет ток.

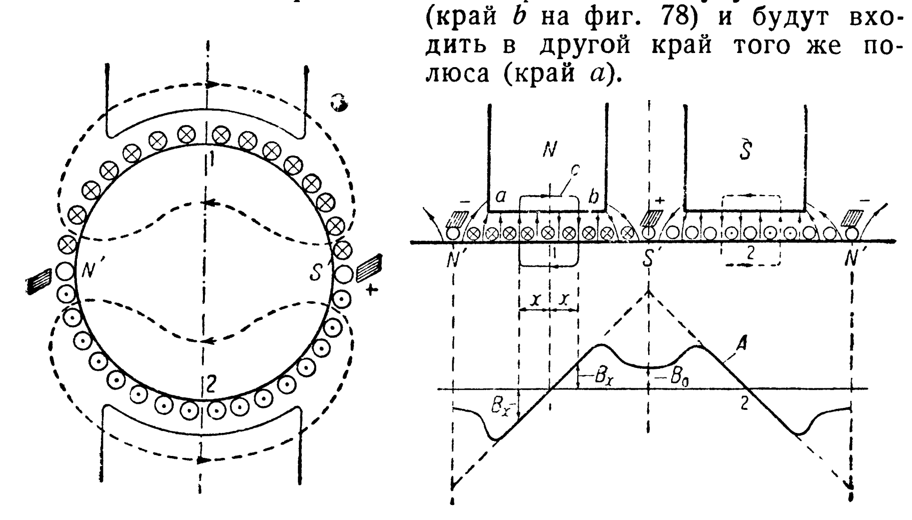
Ампервитки якоря, образованные током, текущим по его обмотке, воздействуют на поле, образованное электромагнитами возбуждения, деформируя его и часто изменяя величину всего потока; такое воздействие якорных ампервитков на магнитное поле машины носит название реакции якоря.

Магнитное поле якоря. На фиг. 77 показана двухполюсная обмотка якоря, по которой течет ток; при этих условиях якорь делается электромагнитом, направление оси которого сов-

падает с прямой, соединяющей две разноименных щетки; на фиг. 77 эта ось направлена по горизонтали, при указанном на этой фигуре направлении токов мы получаем северный конец этого электромагнита N' слева и южный конец S' — справа, у щетки +.

На фиг. 78 эта обмотка якоря изображена еще раз в развернутом виде.

В том случае, если ток течет только по обмотке якоря, а в обмотке электромагнитов возбуждения тока нет, ампервитки якоря вызовут в междужелезном пространстве магнитное поле, силовые линии которого из одного края полюса будут выходить (край b на фиг. 78) и будут входить в другой край того же полюса (край a).



Фиг. 77. Поле реакции якоря (в схематическом изображении).

Фиг. 78. Магнитное поле реакции якоря.

На фиг. 78 показан путь одной из силовых линий c, проходящий через две точки, удаленные относительно середины полюса 1 на расстояние x.

Введем новое обозначение: назовем через AS линейную нагрузку якоря, равную числу амперироводов обмотки якоря, приходящемуся на погонный сантиметр длины окружности якоря; если в каждом из N проводов якоря течет ток i, то $AS = \frac{Ni}{\pi D}$, где D — диаметр якоря.

Силовая линия c, проходящая через две точки, удаленные на расстояние x от середины полюса, сцеплена с числом амперпроводов $2x \cdot AS$.

Пренебрегая магнитным сопротивлением железа якоря и полюса и предполагая, следовательно, что единственным сопротивлением для этой силовой линии является воздушный зазор, мы можем написать

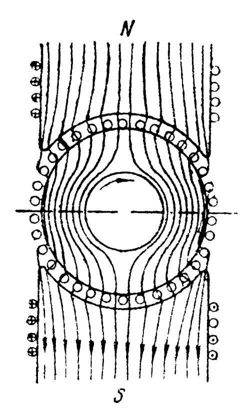
$$2x \cdot AS = 1{,}6 \cdot \delta \cdot B_x,$$

т. е. магнитная индукция в точках x получится

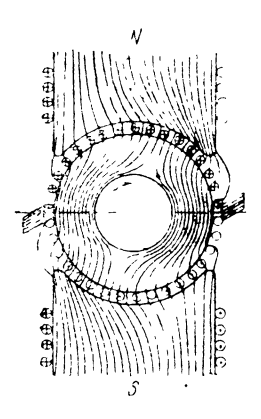
$$B_x = \frac{2x \cdot AS}{1{,}6 \cdot \delta};$$

из последнего уравнения мы видим, что магнитная индукция B_x возрастает пропорционально с увеличением расстояния x от середины полюса.

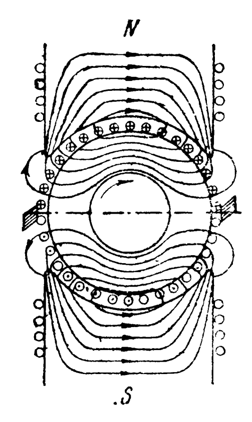
Если бы величина воздушного зазора δ была одинакова по всей длине окружности якоря, то мы бы получили кривую распределения магнитной индукции, изменяющуюся по закону прямой линии, максимумы которой находятся под самыми щетками (пунктир на фиг. 78).



Фиг. 78а. Распределение силовых линий при отсутствии тока в якоре.



Фиг. 78b. Распределение силовых линий при нагрузке (щетки на нейтральной оси).



Фиг. 78с. Распределение силовых линий при отсутствии тока в обмотке возбуждения.

На самом же деле, средняя длина пути силовых линий δ_0 больше, чем δ; магнитная индукция в середине междуполюсного пространства определится

$$B_0 = \frac{\tau \cdot AS}{1{,}6 \cdot \delta_0}. \quad (29{,}1)$$

Вследствие вышесказанного кривая магнитной индукции A в междуполюсном пространстве, вызванная реакцией якоря, имеет седлообразную форму, показанную на фиг. 78.

Искажение магнитного поля возбуждения вследствие реакции якоря. Как уже было замечено, кривая магнитной индукции B имеет симметричную форму только в том случае, если в обмотке якоря тока нет; в противном случае эта кривая искажается благодаря реакции якоря (фиг. 78а, 78b, 78c).

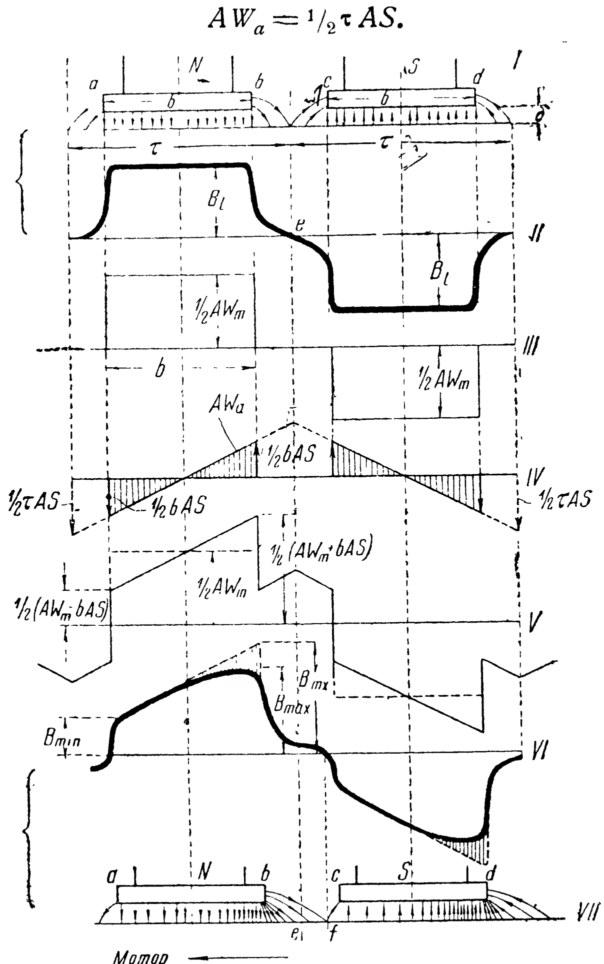
Для построения кривой магнитной индукции при нагрузке (фиг. 79, VI) необходимо найти предварительно результирующую кривую изменения м. д. с. вдоль воздушного зазора машины.

Для этой цели необходимо сложить ординаты кривой м. д. с., создаваемой обмоткой возбуждения полюсов, которая имеет

характер прямоугольника, как показано на фиг. 79, *III*, с ординатами кривой м. д. с. реакции якоря (фиг. 79, *IV*).

Как видно из фиг. 79, кривая ампервитков реакции якоря имеет характер треугольника, причем максимального значения м. д. с. якоря AW_a достигает посередине между главными полюсами:

$$AW_a = {}^1/_2 \tau AS.$$

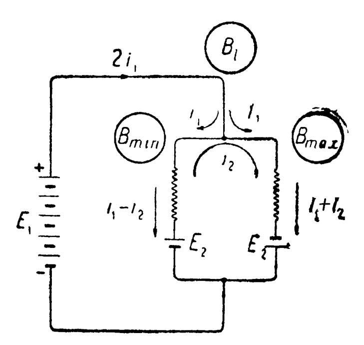


Фиг. 79. Деформация кривой магнитного поля вследствие реакции якоря.

Под краями полюсов м. д. с. реакции якоря равна $^1/_2\ bAS$. Складывая ординаты кривых *IV* и *III*, получим кривую результирующей м. д. с. *V*.

Кривая результирующей магнитной индукции в воздушном зазоре *VI* отличается по своей форме от кривой м. д. с. *V* вследствие влияния магнитного насыщения и увеличенного магнитного сопротивления в междуполюсном пространстве (между кромками полюсных наконечников *b*—*c* по фиг. 79).

Как видно из фиг. 79, *VI*, под влиянием поля реакции якоря происходит искажение кривой магнитной индукции в воздушном зазоре, причем под правым краем полюса, где имеется увеличенная м. д. с. $^1/_2(AW_m + bAS)$, происходит увеличение магнитной индукции до величины $B_{\max}$, а под левым краем полюса, где произошло ослабление м. д. с. до $^1/_2(AW_m - bAS)$ происходит соответственное ослабление магнитной индукции до величины $B_{\min}$. Если бы не было магнитного насыщения, то под правым краем полюса мы бы получили возрастание магнитной индукции до величины $B'_{\max}$, пропорциональное возросшей м. д. с. с $^1/_2\, AW_m$ при холостом ходе до $^1/_2\, (AW_m + bAS)$ при нагрузке. Однако благодаря магнитному насыщению возрастание магнитной индукции под правым краем полюса происходит лишь до величины $B_{\max}$. Вследствие этого полезный поток машины уменьшается на величину, пропорциональную заштрихованной площади на фиг. 79, *VI*.



Фиг. 80. Эквивалентная схема, иллюстрирующая явление реакции якоря.

Если машина работает в ненасыщенной части характеристики, искажение формы кривой магнитной индукции в воздушном зазоре практически не влечет за собой уменьшения магнитного потока машины.

В бóльшинстве случаев, однако, мы имеем дело с машинами, работающими нормально вблизи насыщенной части характеристики. Такие насыщенные машины, как будет показано ниже, являются более устойчивыми в работе и легче по весу (а следовательно, и дешевле).

Явление скашивания магнитного поля под действием реакции якоря можно иллюстрировать следующей аналогией: на фиг. 80 изображена электрическая цепь, состоящая из двух равных сопротивлений и двух батарей с э. д. с. E_1 и E_2; если $E_2 = 0$, то ток $2i_1$ в точке *1* разветвляется на две равные части i_1 и i_2; если $E_2 \neq 0$, то в замкнутой цепи, состоящей из двух сопротивлений, потечет ток i_2, который в правой ветви на фиг. 80 будет иметь одно и то же направление с током i_1, вследствие чего сила тока в этой ветви увеличится до величины $i_1 + i_2$ (аналогия с $B_{\max}$ на фиг. 79), в левой же ветви токи i_1 и i_2 будут иметь разные направления, вследствие чего результирующий ток в этой ветви будет $i_1 - i_2$ (аналогия с $B_{\min}$).

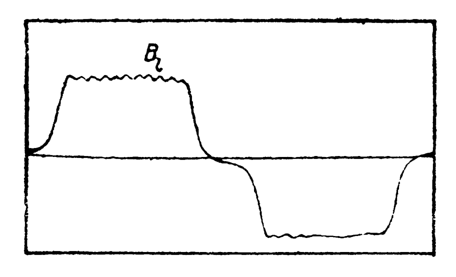
Для иллюстрации вышесказанного на фиг. 81, 82 и 83 приведены осциллограммы, полученные в свое время автором[1] для

---

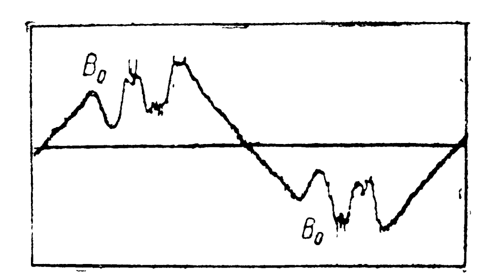
[1] См. статьи автора: 1) „The Electrician", April 7, 1916, „Distribution of Magnetic Flux in Commutating Zone of Direct-Current Machine by Cl. Shenfer; 2) „Электричество" № 10, 1915, К. И. Шенфер, Роль дополнительных полюсов в машинах постоянного тока.

двигателя постоянного тока с дополнительными полюсами завода Ламайера (Lamayer), мощностью в 5 *л. с.*[1]

На фиг. 81 дана осциллограмма кривой магнитной индукции в воздушном зазоре при холостом ходе машины. Эта кривая по своей форме напоминает теоретическую кривую магнитной индукции, приведенную в начале книги (фиг. 62); слегка волнистый характер кривой B_l на фиг. 81 может быть объяснен влия-



Фиг. 81. Кривая магнитной индукции в воздушном зазоре B_l при холостом ходе.



Фиг. 82. Кривая магнитной индукции, создаваемая обмоткой якоря.

нием зубцов железа якоря, благодаря которому величина магнитного сопротивления в каждой точке воздушного зазора при вращении якоря периодически колеблется.

На фиг. 82 показана кривая реакции якоря вышеупомянутой машины. Эта кривая отличается от кривой *A* на фиг. 78 наличностью выступов $B_0 - B_0$, что может быть объяснено фактом уменьшения магнитного сопротивления для поля реакции якоря, вызванного наличностью в нейтральной зоне дополнительных полюсов.

На фиг. 83 приведена кривая магнитной индукции в воздушном зазоре при нагруженном якоре и возбужденных главных полюсах; как видно, эта кривая по своей форме сходна с соответственной кривой фиг. 79.

Фиг. 83. Кривая результирующей магнитной индукции при нагрузке машины.

Ослабление магнитного потока возбуждения, вызываемое поперечным полем якоря. Если бы не было магнитного насыщения, то площади кривых *II* и *VI*, изображенных на фиг. 79, имели бы одну и ту же величину, другими словами, магнитный поток машины не изменялся бы по своей величине от действия поля якоря; при наличности же магнитного насыщения деформация магнитного поля возбуждения сопровождается также уменьшением величины магнитного потока.

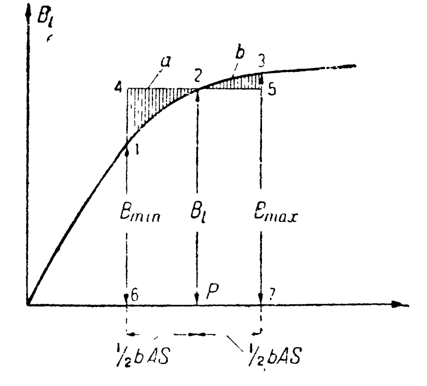
[1] Данные этого двигателя см. ниже в главе о коммутации.

Главное сопротивление для магнитной цепи какой-нибудь силовой трубки *c* (фиг. 78) поля якоря лежит в воздушном зазоре и зубцах, сопротивлением же в самом полюсе и железе якоря мы можем пренебречь.

Построим кривую зависимости между B_l и числом зубцовых и воздушных ампервитков $^1/_2(AW_l + AW_z)$, приходящихся на один полюс.

На фиг. 84 показана полученная таким образом характеристика; она мало отличается от характеристики холостого хода, которую можно поэтому применять для нижеизложенной цели в тех случаях, когда не требуется особенно большой точности.

При холостом ходе машины, когда реакцией якоря можно пренебречь, мы имеем под полюсным башмаком магнитную индукцию B_l всюду одинаковой величины, чему соответствует число ампервитков OP (фиг. 84); при нагрузке якоря мы имеем под одним краем полюса число ампервитков равным $OP + {^1/_2}b \cdot AS$ и под другим краем того же полюса число ампервитков $OP - {^1/_2}b \cdot AS$, по кривой фиг. 84 для $OP + {^1/_2}b \cdot AS$ мы находим магнитную индукцию B_{max} и для $OP - {^1/_2}b \cdot AS$ находим B_{min}.



Фиг. 84. Переходная характеристика

Таким образом часть кривой *1-2-3* на фиг. 84 дает нам картину распределения магнитной индукции под полюсом в междужелезном пространстве при нагрузке якоря.

Площадь прямоугольника *6-4-5-7*, пропорциональная произведению $b \cdot B_l$, в некотором масштабе может изображать нам величину магнитного потока машины при холостом ходе; величина потока при нагрузке будет пропорциональна площади фигуры *6-1-2-3-7*. Если бы магнитное насыщение совершенно отсутствовало, кривая линия *1-2-3* превратилась бы в прямую, вследствие чего заштрихованные площади *a* и *b* сделались бы равными друг другу; другими словами уменьшение общего числа силовых линий под одним краем полюса было бы укомпенсировано соответственным увеличением числа линий под другим краем, вследствие чего величина всего потока не изменилась бы.

Фиг. 84, однако, показывает, что площади *a* и *b* не равны друг другу, откуда следует, что благодаря магнитному насыщению поперечное поле реакции якоря вызывает уменьшение магнитного потока.

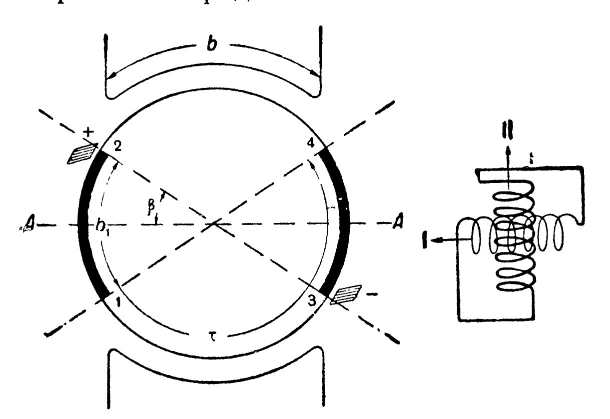
Из фиг. 84 видно, что, чем дальше вправо от „колена" характеристики будет расположена точка *2*, тем меньше будет разница между площадями *a* и *b* и величинами B_{max} и B_{min}, т. е. тем

меньше будет изменение магнитного потока и искажение его поля, вызванное реакцией якоря.

Поэтому для этой цели полезно давать зубцам якоря большие насыщения или брать большие воздушные зазоры.

§ 30. Реакция якоря при щетках, смещенных относительно геометрической нейтрали. Как будет выяснено ниже в главе о коммутации, во избежание искрения коллектора иногда щетки приходится смещать на некоторый угол β относительно геометрической нейтрали *АА* (фиг. 85).

В этом случае при смещенных щетках на угол β всю обмотку якоря можно представить себе состоящей как бы из двух обмоток.



Фиг. 85. Ампервитки реакции якоря: продольные (жирные линии) и поперечные (тонкие линии).

Одна обмотка, образованная частью проводов, или как можно еще сказать, образованная „поясами тока" *1*-*2* и *3*-*4* (на фиг. 85 обозначено жирными линиями), имеет свою ось совпадающей с осью магнитов возбуждения; она создает магнитное поле, которое может или ослабить или усилить поле, создаваемое магнитами возбуждения; ампервитки этой обмотки называют продольными ампервитками. (Как будет видно ниже, щетки обычно приходится смещать таким образом, что продольные ампервитки действуют на поле возбуждения размагничивающим образом.)

Другая часть обмотки якоря, образованная поясами токов *2*-*4* и *1*-*3* (фиг. 85), образует магнитное поле, ось которого составляет с осью полюсов угол в 90°; это „поперечное" (по отношению к главному) поле действует на главное поле деформирующим образом, не производя уменьшения магнитного потока при слабых насыщениях.

На фиг. 85 сбоку для ясности показаны схематически: „поперечная" обмотка *I* и „продольная" обмотка *II* якоря в виде двух цилиндрических катушек.

Число размагничивающих ампервитков якоря может быть выражено (фиг. 85):

$$AW_r = b_1 \cdot AS.$$

Если щетки смещены под самый край полюса, то

$$b_1 = \tau - b,$$

и следовательно,

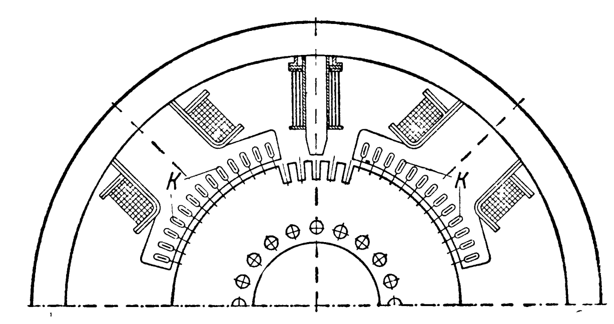
$$AW_r = (\tau - b) \cdot AS.$$

Если щетки смещены на меньший угол, то можно написать

$$AW_r = C \cdot (\tau - b) \cdot AS, \qquad (30,1)$$

где коэфициент C обычно колеблется (в машинах без дополнительных полюсов) в пределах:

$$^1/_2 < C < 1.$$



Фиг. 86. Машина с компенсирующей обмоткой.

В машинах, имеющих дополнительные полюса, щетки обычно располагаются в геометрической нейтрали; поэтому для этого случая мы имеем

$$C = 0 \text{ и } AW_r = 0.$$

Число ампервитков AW_q, образованное поперечной обмоткой] I, на основании фиг. 85 определится

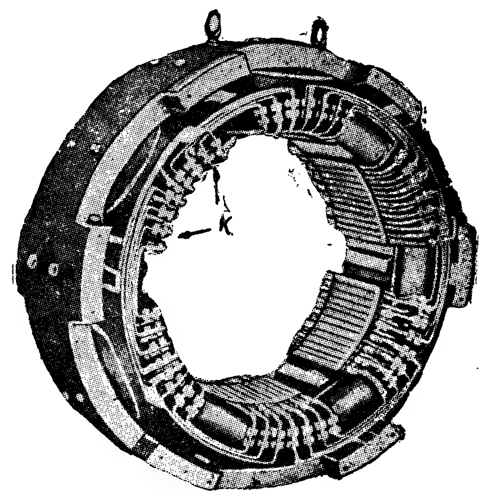
$$AW_q = (\tau - b_1) \cdot AS.$$

Если щетки находятся в геометрической нейтральной зоне, то $b_1 = 0$ и

$$AW_q = AW_a = \tau \cdot AS,$$

где AW_a — число ампервитков якоря, приходящееся на пару полюсов; число ампервитков на один полюс будет

$$AW_a = 0{,}5\tau \cdot AS. \qquad (30,2)$$



Фиг. 87. Станина машины постоянного тока с компенсирующей обмоткой.

§ 31. Компенсирующие обмотки. Искажение магнитного поля, вызываемое поперечными ампервитками, во многих отношениях вредно отзывается на работе машины; оно повышает потери на гистерезис и токи Фуко в якоре и затрудняет коммутирование, повышая в некоторых местах коллектора разность потенциалов между смежными коллекторными пластинами (см. главу о коммутации).

Поэтому в особо трудных случаях для коммутации (турбогенераторах, моторах с ударной нагрузкой и т. п.) применяются особые компенсирующие обмотки, которые закладываются в пазы, проштампованные в полюсных наконечниках. Эти обмотки соеди-

няются последовательно с якорными и компенсируют скашивающие поля якоря по всей длине части окружности якоря, лежащей под главными полюсами при всяких нагрузках якоря, при условии, что линейная нагрузка компенсирующей обмотки равна линейной нагрузке якоря. [1]

Компенсирующие обмотки удорожают машину и вносят некоторое усложнение в ее конструкцию; эти обмотки применяются поэтому в сравнительно редких случаях.

На фиг. 86 показан схематический чертеж машины постоянного тока, снабженной компенсирующей обмоткой. На фиг. 87 дана фотография остова турбогенератора постоянного тока мощностью в 1 300 kW (на фиг. 86 и 87 буквой *K* обозначены компенсирующие обмотки).

ГЛАВА ПЯТАЯ

КОММУТАЦИЯ

§ 32. Общие представления и обозначения. При вращении якоря какая-нибудь секция обмотки *K* (фиг. 88) до начала в ней коммутации тока находится в одной какой-нибудь параллельной ветви якоря *I*, в которой ток имеет величину и направление, скажем, $+i_a$; в самый момент коммутации эта секция замыкается щеткой на короткое и тем выключается из ветвей; наконец, по окончании коммутации эта секция попадает в другую параллельную ветвь якоря *II*, где ток имеет ту же величину, что и в ветви *I*, но обратное направление $-i_a$ (фиг. 88).

Таким образом за все время коммутации ток в секции должен измениться с величины $+i_a$ до величины $-i_a$.

Нашей задачей в дальнейшем будет выяснение вопроса о том, как влияет такое резкое изменение тока, текущего в секции, с $+i_a$ на $-i_a$ на процесс коммутации.

Введем следующие обозначения:

k — число коллекторных пластин;

β — коллекторное деление, равное ширине коллекторной пластины плюс толщина изоляции между двумя коллекторными пластинами (фиг. 88);

v — окружная скорость якоря;

b — ширина щетки;

---

[1] Для этой цели компенсирующие обмотки соединяются с якорной таким образом, чтобы м. д. с. этой обмотки была направлена противоположно м. д. с. обмотки якоря.

Для того чтобы компенсация поля якоря была совершенной, необходимо, чтобы компенсирующая обмотка представляла как бы „зеркальное отображение" обмотки якоря, т. е. чтобы она имела то же число проводников, что и обмотка якоря, и чтобы эти проводники были размещены по окружности совершенно так же, как и в якорной обмотке. На практике это требование выполняется редко, м. д. с. компенсирующей обмотки обычно лишь приблизительно компенсирует м. д. с. якоря во всех точках его окружности.

$b_D = b\frac{D}{D_k}$ — ширина щетки, приведенная к окружности якоря (D — диаметр якоря, D_k — диаметр коллектора);

$\beta_D = \beta\frac{D}{D_k}$ — ширина коллекторного деления, приведенного к окружности якоря;

$\frac{b}{\beta} = \frac{b_D}{\beta_D} = n$ — число коллекторных делений, перекрытых щеткой;

T — время короткого замыкания одной секции или продолжительность коммутации;

t — время, протекшее от начала коммутации;

w — число витков одной секции;

i_a — ток в параллельной ветви якоря;

i_1 — ток в набегающей коллекторной пластине;

i_2 — ток в сбегающей коллекторной пластине;

i — ток в короткозамкнутой секции;

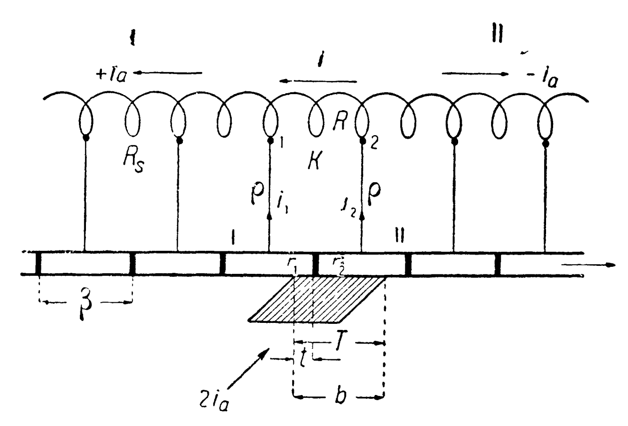
R_s — сопротивление секции;

ρ — сопротивление провода, соединяющего коллекторную пластину с секцией;

R — переходное сопротивление щетки.

δ — плотность тока.

§ 33. Коммутация при $b = \beta$ и очень малой окружной скорости ($v \approx 0$). На фиг. 88 показана секция, короткозамкнутая щеткой. Коммутация в рассматриваемой нами секции начинается в тот момент, когда левый край щетки начинает соприкасаться с коллекторной пластиной I, т. е. когда $t = 0$.



Фиг. 88. Обмотка якоря и короткозамкнутая секция K.

В этот момент времени $i_2 = 2i_a$, $i_1 = 0$ и ток в рассматриваемой нами секции $i = +i_a$. По мере перемещения коллекторных пластин I и II под щеткой в указанном на фиг. 88 направлении токи i_2 и i начинают убывать, а ток i_1 возрастает по своей величине. За все время коммутации ток в короткозамкнутой секции должен изменяться с $+i_a$ на $-i_a$.

Для того чтобы ответить на вопрос, по какому закону меняется ток i в течение процесса коммутации, рассмотрим замкнутый контур, образованный секцией K, двумя соединительными проводами ρ и ρ, двумя коллекторными пластинами I и II и щеткой.

Для простоты предположим, что сопротивлением секции и соединительных проводников $R_s + 2\rho$ можно пренебречь по сравнению с контактным сопротивлением набегающего края r_1 и сбегающего края r_2 щетки.

Применяя второй закон Кирхгофа для замкнутого контура, мы можем написать

$$\Sigma i \cdot r = \Sigma e,$$

или

$$i_1 \cdot r_1 - i_2 r_2 = 0, \qquad (33,1)$$

так как в замкнутом контуре нет никаких э. д. с. (при условии, что скорость машины весьма невелика, так что $v \approx 0$).

К этому уравнению можно еще присоединить два уравнения, которые получаются, если к точкам разветвления *1* и *2* на фиг. 88 применить первый закон Кирхгофа

$$i_1 = i_a - i; \qquad (33,2)$$

$$i_2 = i_a + i. \qquad (33,3)$$

Решая три вышенаписанные уравнения (33,1), (33,2) и (33,3), мы получаем

$$i = i_a \frac{r_1 - r_2}{r_1 + r_2}. \qquad (33,4)$$

Найдем величину контактного сопротивления набегающего края щетки r_1; так как сопротивление щеточных контактов находится в обратно пропорциональной зависимости от поверхности соприкосновения с коллектором и так как поверхность контакта набегающего края щетки во столько раз меньше поверхности всего контакта щетки, во сколько раз t меньше чем T, то мы можем написать

$$\frac{r_1}{R} = \frac{T}{t},$$

откуда

$$r_1 = R \frac{T}{t}.$$

Точно так же можно написать

$$\frac{r_2}{R} = \frac{T}{T - t}, \qquad (33,5)$$

откуда

$$r_2 = R \frac{T}{T - t}. \qquad (33,6)$$

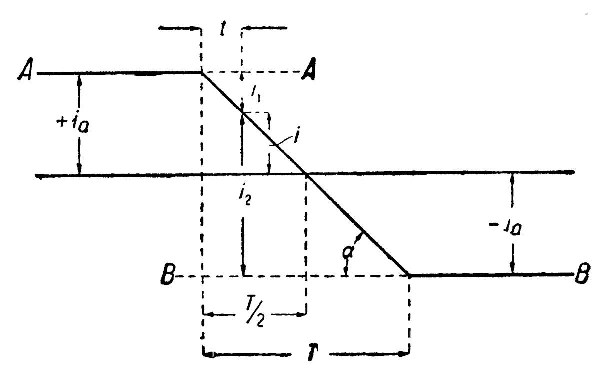
Подставляя (33,5) и (33,6) в (33,4), получим окончательно

$$i = i_a \left(1 - \frac{2t}{T}\right). \qquad (33,7)$$

Полученная здесь функциональная зависимость между i и t представляет собой уравнение прямой линии; эта прямая изображена на фиг. 89.

Подставляя в уравнение (33,7) $t = 0$, мы имеем $i = +i_a$; при $t = \frac{T}{2}$ мы получаем $i = 0$ и при $t = T$ $i = -i_a$.

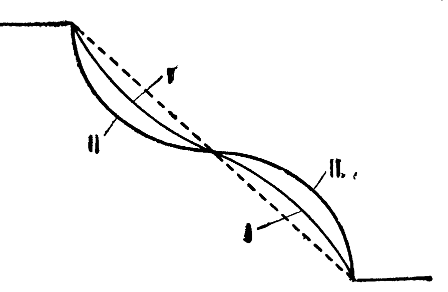
Ординаты между наклонной прямой и осью абсцисс на фиг. 89 дают нам величину тока i в короткозамкнутой секции в каждый момент времени t, протекший от начала коммутации; расстояние по вертикали между горизонталью AA и наклонной прямой дает нам величину токов i_1 в набегающей коллекторной пластине и расстояние по вертикали между горизонталью BB и наклонной прямой — величину токов i_2 в сбегающей коллекторной пластине.



Фиг. 89. Ток в секции i в случае прямолинейной коммутации.

В случае „прямолинейной“ коммутации (т. е. когда сила тока в короткозамкнутой секции изменяется по закону прямой линии) плотность тока во всех точках контактной поверхности щетки имеет постоянную величину.

Случай: $R_s + 2\rho \neq 0$. Уравнение (33,7) было нами получено в предположении, что омическое сопротивление секции R_s и сопротивление соединительных коллекторных проводов ρ настолько невелико, что величиной $R_s + 2\rho$ можно пренебречь по сравнению с величиной переходного сопротивления щетки.



Фиг. 90. Ток в короткозамкнутой секции в случае непрямолинейной коммутации.

Если величиной $R_1 = R_s + 2\rho$ пренебречь нельзя, то, применяя второй закон Кирхгофа к замкнутому контуру короткозамкнутой секции (фиг. 88), мы вместо уравнения (33,1) получим следующее уравнение:

$$i_1 \cdot r_1 + i_1 \cdot \rho - i \cdot R_s - i_2 \rho - i_2 \cdot r_2 = 0. \qquad (33,8)$$

Присоединяя к этому уравнению еще полученные выше уравнения (33,2), (33,3), (33,5) и (33,6) и решая эту систему уравне-

ний, мы получим

$$i=\frac{i_a(T-2t)}{\frac{R_1}{R}\cdot\frac{t}{T}(T-t)+T}. \tag{33,9}$$

Полученное уравнение уже не представляет собой уравнения прямой линии, как в предыдущем случае; если построить это уравнение по точкам, то получается изогнутая кривая, подобная кривой *I*, изображенной на фиг. 90; изогнутость этой кривой возрастает при увеличении относительной величины сопротивления $R_1=R_s+2\rho$ (кривая *II* на фиг. 90). Обычно в машинах нормального типа величина R_1 бывает небольшой, так что кривая тока i при малых скоростях очень мало отличается от прямой.

§ 34. Коммутация при $v\neq 0$. При вращении якоря с конечной скоростью изменение тока в короткозамкнутой секции с $+i_a$ на $-i_a$ вызывает в ней э. д. с. самоиндукции e, величина которой тем больше, чем больше скорость вращения якоря, чем больше сила тока якоря и чем больше величина коэфициента самоиндукции секции L. Пренебрегая величиной $R_1=R_s+2\rho$ и применяя к замкнутому контуру на фиг. 88 второй закон Кирхгофа, мы можем написать

$$\Sigma i\cdot r=\Sigma e;$$

$$i_1\cdot r_1-i_2\cdot r_2=-L\frac{di}{dt}. \tag{34,1}$$ [1]

Это уравнение отличается от полученного нами выше уравнения (33,1) наличностью члена $-L\frac{di}{dt}$, равного э. д. с. самоиндукции короткозамкнутой секции.

Присоединяя к уравнению (34,1) полученные выше уравнения (33,2) и (33,3) и решая эту систему уравнений, мы получим следующее выражение для тока i, текущего в короткозамкнутой секции:

$$i=i_a\frac{r_1-r_2}{r_1+r_2}+\frac{L\frac{di}{dt}}{r_1+r_2}. \tag{34,2}$$

Это уравнение от уравнения (33,4) отличается наличностью второго члена в правой его части.

Обозначив

$$i_a\frac{r_1-r_2}{r_1+r_2}=i_g,$$

$$L\frac{di}{dt}=e_s,$$

[1] Короткозамкнутая секция вращается в поле реакции якоря, которое наводит в секции э. д. с., имеющую общее направление с э. д. с. самоиндукции $L\frac{di}{dt}$. Для упрощения мы эту э. д. с. здесь не рассматриваем.

$$r_1 + r_2 = r_x$$

и

$$\frac{L\frac{di}{dt}}{r_1 + r_2} = \frac{e}{r_x} = i_s,$$

мы можем уравнение (34,2) переписать следующим образом:

$$i = i_g + i_s.$$

Последнее уравнение показывает, что ток i короткозамкнутой секции мы можем рассматривать как бы состоящим из суммы двух токов:

1) тока „прямолинейной коммутации" i_g, который бы протекал в цепи короткозамкнутой секции при условии, что э. д. с. самоиндукции равна 0, и

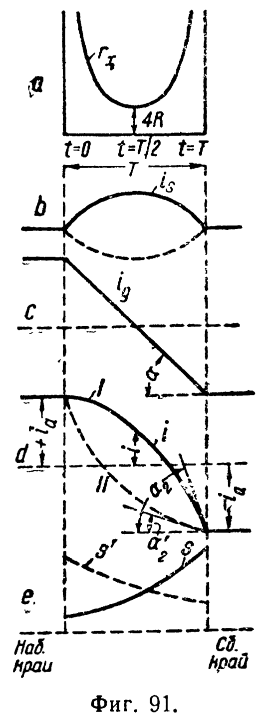
2) тока, вызванного э. д. с. самоиндукции i_s (в дальнейшем i_s будем называть „добавочным током коммутации").

Добавочный ток находится в прямо пропорциональной зависимости от э. д. с. самоиндукции e_s и в обратно пропорциональной от сопротивления короткозамкнутой секции $r_x = r_1 + r_2$, как это показывает уравнение

$$i_s = \frac{e_s}{r_x} = \frac{L\frac{di}{dt}}{r_1 + r_2}. \tag{34,3}$$

Сопротивление короткозамкнутой секции r_x представляет собой переменную величину, которая зависит от положения щетки относительно коллекторных пластин; на основании уравнений (33,5) и (33,6) мы можем написать

$$r_x = r_1 + r_2 = R\frac{T}{t} + R\frac{T}{T - t}.$$



Фиг. 91.

На основании последнего уравнения мы видим, что при $t = 0$ и $t = T$ получается $r_x = \infty$; при $t = \frac{T}{2}$ получается $r_x = 4R$; построенное по точкам это уравнение представляет собой U-образную кривую, обе ветви которой удаляются в бесконечность; на фиг. 91, *a* показан примерный вид этой кривой.

Рассматривая фиг. 91, мы видим, что добавочный ток i_s имеет величину, равную нулю для двух точек: $t = 0$ и $t = T$, и достигает своей максимальной величины где-то вблизи точки $t = \frac{T}{2}$.

На фиг. 91, *b* показана примерная кривая тока i_s.

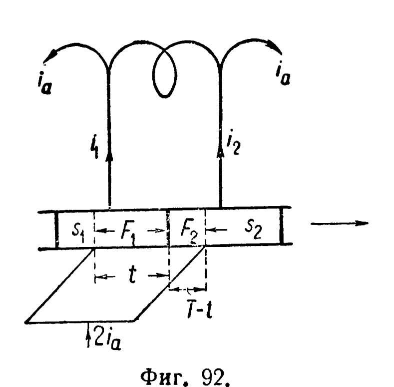
Путем сложения ординат точки i_s (фиг. 91, *b*) и тока „прямолинейной коммутации" i_g (фиг. 91, *c*) мы в результате получаем ток i, текущий в секции в момент ее короткого замыкания (кривая I на фиг. 91, *d*).

Рассматривая кривую I, мы видим, что теперь, когда щетка поровну перекрывает две смежные коллекторные пластины, ток в короткозамкнутой секции не равен нулю, как это было в случае „прямолинейной коммутации", а равен некоторой конечной величине i: в процессе коммутации ток i как бы „не успевает" упасть до нуля к моменту времени $t = \frac{T}{2}$, т. е., другими словами, здесь происходит „замедление" коммутации.

Проводя касательные к кривой I, мы замечаем, что углы наклона этих касательных к оси абсцисс в разных точках разные, т. е., другими словами, что плотность тока в разных точках контактной поверхности щетки получается разная (см. § 35); наибольшей величины плотность тока при этом достигает под самым сбегающим краем щетки; для этой точки $t = T$ мы имеем $a_1 > a$ (ср. фиг. 91, *c* и *d*), т. е. плотность тока под сбегающим краем щетки при замедленной коммутации получается бо́льшей, чем при „прямолинейной".

На фиг. 91, *e* показана примерная кривая распределения плотности тока S в контактной поверхности щетки при замедленной коммутации; в случае прямолинейной коммутации кривая S представляла бы собой прямую, параллельную оси абсцисс.

§ 35. Плотность тока в контакте щетки. Зная очертания кривой тока i в короткозамкнутой секции, можно графически для каждого положения коллекторных пластин относительно щетки найти соответственную среднюю плотность тока под набегающей и сбегающей пластинами s_1 и s_2.



Фиг. 92.

Обозначив согласно фиг. 92 через F_1 и F_2 площади поверхности набегающего и сбегающего контакта щетки, найдем соответственные плотности тока:

$s_1 = \frac{i_1}{F_1}$ — набегающий край щетки,

$s_2 = \frac{i_2}{F_2}$ — сбегающий край щетки.

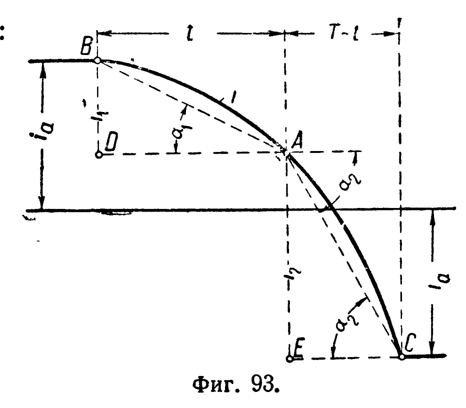
Принимая во внимание, что $F_1 \approx t$ и $F_2 \approx T - t$, напишем эти выражения в другом виде:

$$s_1 \equiv \frac{i_1}{t},$$

$$s_2 \equiv \frac{i_2}{T - t}.$$

Согласно фиг. 93 мы имеем:

$$i_1 \equiv BD,$$
$$i_2 \equiv AE,$$
$$t \equiv AD,$$
$$T - t \equiv EC.$$



Фиг. 93.

Поэтому можно написать:

$$s_1 \equiv \frac{i_1}{t_1} \equiv \frac{BD}{AD},$$

$$s_2 \equiv \frac{i_2}{T-t} \equiv \frac{AE}{EC}.$$

Таким образом, рассматривая прямоугольные треугольники ABD и AEC на фиг. 93, мы приходим к следующему заключению:

$$s_1 \equiv \operatorname{tg} \alpha_1,$$

$$s_2 \equiv \operatorname{tg} \alpha_2.$$

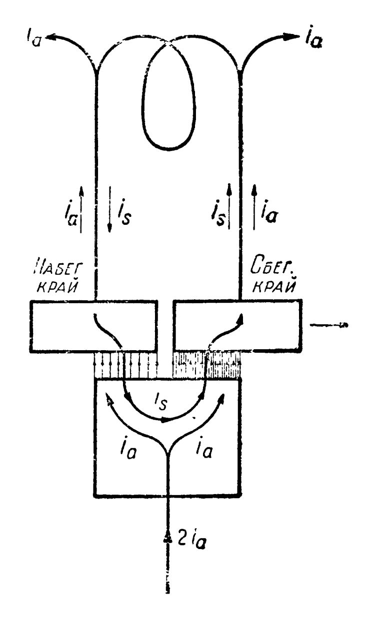
Отсюда мы видим, что форма кривой очертания тока i, полученная для того или другого случая (например, заснятая при помощи осциллографа), дает указания относительно распределения плотности тока под сбегающим s_2 и набегающим s_1 краями щетки.

Таким образом круто протекающая ниспадающая часть кривой тока i указывает на увеличенную плотность тока в контакте сбегающего края.

Сравнивая фиг. 93 с фиг. 89, мы видим, что при прямолинейной коммутации получается

$$s_1 = s_2 = \operatorname{tg} \alpha_1 = \operatorname{tg} \alpha_2 = \text{const},$$

т. е. плотность тока во всех точках контакта получается одинаковой.



Фиг. 94. Распределение плотности тока в рабочем контакте щетки под влиянием добавочного тока i_s.

§ 36. Причина искрения. На фиг. 94 показана секция обмотки якоря, в момент коммутации замкнутая щеткой на короткое.

Если бы не было добавочного тока, вызываемого э. д. с. самоиндукции, то при симметричном положении щетки относительно коллекторных пластин, показанном на фиг. 94, ток, притекающий к щетке, разветвлялся бы в ней на две равные

части i_a, и плотность тока во всех точках контакта щетки была бы одинакова.

Добавочный ток i_s, замыкающийся через щетку, нарушает эту равномерность; как видно на фиг. 94, под правым краем щетки (сбегающим) токи i_a и i_s имеют одинаковое направление, поэтому здесь устанавливается бо́льшая плотность тока (на фиг. 94 показано густой штриховкой); под левым (набегающим) краем щетки токи i_a и i_s имеют разное направление, поэтому здесь устанавливается меньшая плотность тока (на фиг. 94 показано редкой штриховкой).

Нагруженный чрезмерной плотностью тока край щетки обычно быстро подгорает, что влечет за собой искрение коллектора.

Во избежание искрения щеток на коллекторе приходится добиваться равномерного распределения плотности тока в контакте щеток. С точки зрения хорошей коммутации целесообразно установить такой режим работы щеток, при котором увеличенная плотность тока была бы на набегающем крае щетки, а уменьшенная плотность тока наблюдалась бы на сбегающем крае (так называемая „ускоренная коммутация").

§ 37. Общий вид искрящей щетки. При хороших условиях коммутации искрения под щетками не должно наблюдаться.

Нужно сказать, однако, что небольшие искорки, наблюдаемые под сбегающим краем щетки, не представляют собой никакой опасности для машины.

Не представляют опасности также небольшие искры каплевидной формы с беловатым оттенком, встречающиеся иногда в машинах большой мощности.

Однако бывают случаи, когда искрение под щетками приобретает другой вид, который характеризуется тем, что искры как бы выскакивают из-под щетки „острием", причем самый щеточный огонь имеет „треугольную форму".

При таком искрении „треугольной, или язычковой, формы" самое искрение уже не имеет беловато-голубого цвета, но содержит в себе желтоватый оттенок. [1]

„Язычковое" искрение должно быть отнесено к опасным для машины явлениям, так как влечет за собой повреждение коллектора, при этом часто наиболее обгорают те пластины коллектора, которые присоединены к сбегающим стержням обмотки каждого паза.

Третьей, еще более опасной, стадией искрения является так называемое „брызгающее" искрение; последнее характеризуется тем, что из-под щеток во время работы машины выбрасываются искры, имеющие вид огненных брызг.

Этот вид искрения является весьма опасным, так как может испортить коллектор в течение нескольких часов, после чего потребуется обточка его поверхности.

---

[1] Желтовато-зеленоватый оттенок искр объясняется испарением коллекторной меди, вызванным вольтовыми дугами под щетками.

Таким образом, резюмируя все сказанное, мы приходим к следующей градации искрообразования под щеткой в смысле его вредности.

1. Небольшие, едва заметные искорки.

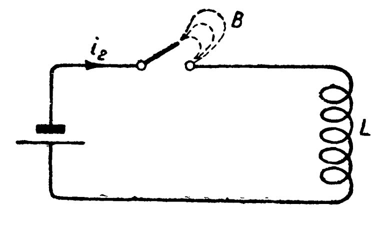
2. Небольшие искры каплевидной формы с беловатым оттенком.

3. „Язычковое" искрение желтоватого оттенка.

4. „Брызгающие" искры.

Как было сказано выше, опасными формами искрения являются третья и четвертая согласно этой градации.

§ 38. Современная точка зрения на процессы искрения на коллекторе. Самый простой метод объяснения причины искрения щетки на коллекторе, описанный выше и объясняющий искрение появлением увеличенной плотности тока под сбегающим краем щетки, может быть рассматриваем как весьма приближенный, так как он не учитывает ряда экспериментальных фактов, ставших известными в сравнительно недавнее время.



Фиг. 95.

Опыты, производимые на медном контактном кольце, показывают, что в щетке, расположенной на этом кольце, можно плотность тока довести до очень больших значений, и тем не менее при спокойной работе и отсутствии вибрации щетки искрения в ней обычно не наблюдается.

В этом отношении весьма показательными являются опыты Гельмунда и Людвига, которые доводили плотность тока в контакте щетки до громадной величины — в 300 А/cm² и выше, но все же при спокойной работе щеток искрения не получали.[1]

Эти опыты заставляют нас пересмотреть наши воззрения на причины, вызывающие искрение на коллекторе.

Каким же образом, принимая во внимание все вышеизложенное, можно объяснить причину искрения щеток на коллекторе.

Искрение на коллекторе можно рассматривать как своеобразный процесс размыкания цепи, содержащей самоиндукцию.

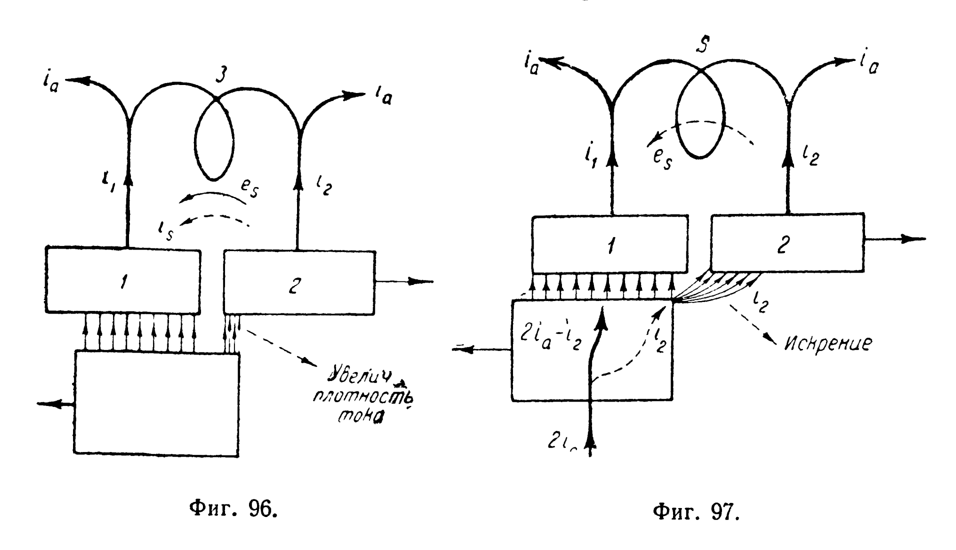
Хорошо известно, что при размыкании с помощью рубильника замкнутого контура с катушкой L большой индуктивности между ножами рубильника появляется вольтова дуга B, мощность которой находится в прямой зависимости от экстратока размыкания (фиг. 95).

С этой точки зрения искрение на коллекторе можно рассматривать как мелкие вольтовы дуги, появляющиеся под щеткой при непрерывно происходящих размыканиях коммутируемых секций.

Сказанное поясняет фиг. 96 и 97, где изображена секция обмотки якоря S, находящегося в разных стадиях короткого замыкания.

[1] См. „Electrical Engineering" № 11 1935.

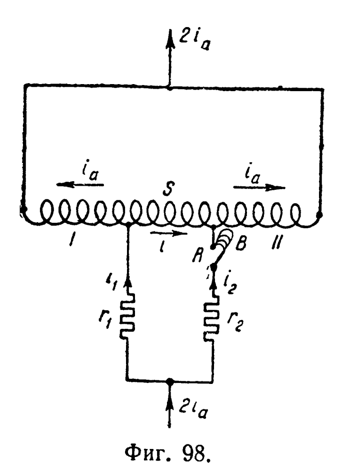
На фиг. 96 сбегающая коллекторная пластина 2 нагружена током i_2; на этой фигуре показано, что под сбегающим краем щетки мы имеем увеличенную плотность тока (это на фиг. 96 отмечено соответственно сгущенной штриховкой).



Фиг. 96.

Фиг. 97.

Спустя некоторое время пластина 2 совсем сойдет со щетки, так что непосредственный контакт между ней и коллекторной пластиной 2 прекращается.



Фиг. 98.

Однако в случае неблагоприятных условий коммутации, связанных, главным образом, с влиянием самоиндукции катушки S, ток i_2 под сбегающим краем щетки при этом не упадет до нуля, а будет существовать в виде „тока размыкания“ и в форме небольшой вольтовой дуги будет продолжать притекать к сбегающей пластине 2.

Явления, происходящие под щеткой искрящей машины, могут быть с большой наглядностью описаны при помощи схемы замещения, изображенной на фиг. 98.

На этой схеме катушки самоиндукции *I* и *II* замещают собой обе половины двухполюсной обмотки якоря; катушка S изображает собой секцию обмотки якоря, в которой происходит коммутация; r_1 — r_2 — реостаты, эквивалентные контактным сопротивлениям набегающего и сбегающего края щетки.

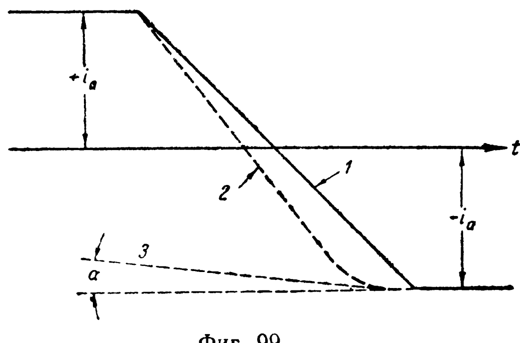
Когда щетка начинает сбегать с соответственной коллекторной пластины, начинается процесс размыкания до того замкнутой

накоротко щеткой цепи секции S; этот процесс размыкания на схеме замещения осуществляется рубильником R.

Из фиг. 98 ясно, что благодаря влиянию самоиндукции секции S размыкание тока i_2 должно сопровождаться появлением вольтовой дуги B. Если бы секция S не представляла собой самоиндукции, то при размыкании рубильника на фиг. 98 мы практически не получили бы вольтовой дуги размыкания, что соответствовало бы коммутации без искрения.

Как добиться безыскровой коммутации?

Согласно предыдущему и на основании фиг. 96 и 97 видно, что под сбегающим краем щетки в момент, когда коллекторная пластина 2 начинает сходить со щетки, происходит п р о ц е с с о б р ы в а т о к а i_2, причем благодаря влиянию самоиндукции короткозамкнутой секции этот процесс затягивается в форме вольтовой дуги. „Обрыва" вольтовой дуги не было, т. е. коммутация происходила бы без искрообразования, если бы к моменту схода сбегающей пластины 2 со щетки ток i_2 сбегающего края упал бы до нуля.



Фиг. 99.

Отсюда видно, что необходимо добиться такого положения, при котором во время работы машины плотность тока в последнем элементе сбегающего края щетки равнялась бы нулю, или вообще была бы небольшой.

При этих условиях кривая изменения тока в короткозамкнутой секции должна иметь очертание пунктирной кривой 2 (фиг. 99), при которой угол α между касательной 3, проведенной в точке, соответствующей концу коммутации, и горизонталью был бы невелик или равен нулю.

Для получения вышеуказанной кривой 2 вместо прямой линии 1 (соответствующей так называемой „прямой коммутации") необходимо в коммутационной зоне создать соответственные условия для получения у с к о р е н н о й к о м м у т а ц и и.

Для этой цели необходимо рассчитать дополнительные полюса таким образом, чтобы э. д. с. e_k, создаваемая в короткозамкнутой секции дополнительными полюсами для компенсации реактивного напряжения e_r, была соответственным образом больше последнего. Из всего изложенного ясны преимущества ускоренной коммутации в электрических машинах.

Кроме того, следует здесь отметить, что машины с ускоренной коммутацией лучше переносят перегрузку и „толчки" тока, при которых большие затруднения может создать явление замедления нарастания потока дополнительного полюса, вызванного действием токов Фуко, индуктированных в массивных сердеч-

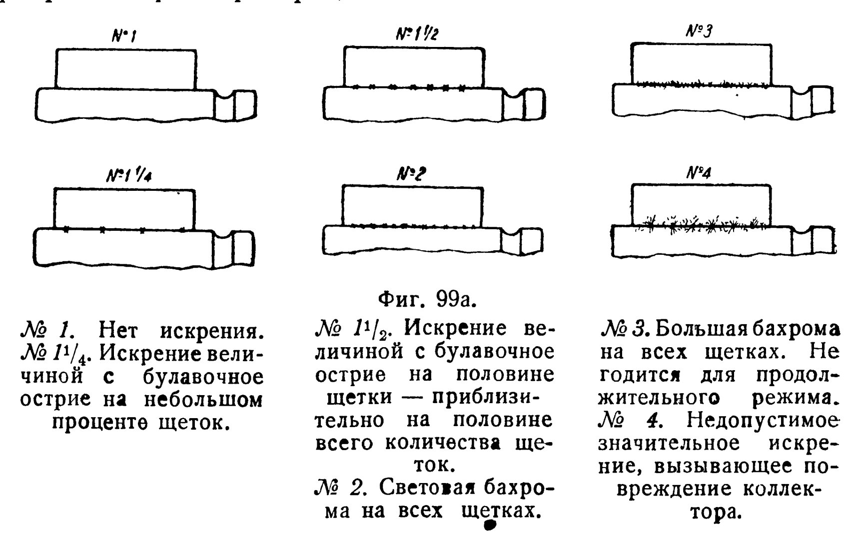
никах дополнительных полюсов и станине машины в моменты переходных процессов.

Американская фирма GEC расчет моторов постоянного тока для блюмингов ведет таким образом, чтобы получилось отношение $\frac{e_2}{e_1} = \frac{2}{3}$, где e_2 — падение напряжения в щеточном контакте для сбегающего края и e_1 — падение напряжения для набегающего края щетки.

Все вышеизложенное не следует понимать таким образом, что только „ускоренная“ коммутация исключительно может обеспечить безыскровую работу машины.

Ускоренную коммутацию приходится рекомендовать в случае, когда машина бывает подвержена частым перегрузкам и толчкам тока (вроде трамвайных двигателей).

При спокойной нагрузке машины часто нет необходимости в ускоренной коммутации, и хорошие результаты получаются при равномерном распределении плотности тока под щетками.



Фиг. 99а.

№ 1. Нет искрения.
№ 1¼. Искрение величиной с булавочное острие на небольшом проценте щеток.

№ 1½. Искрение величиной с булавочное острие на половине щетки — приблизительно на половине всего количества щеток.
№ 2. Световая бахрома на всех щетках.

№ 3. Большая бахрома на всех щетках. Не годится для продолжительного режима.
№ 4. Недопустимое значительное искрение, вызывающее повреждение коллектора.

На наших заводах применяется оценка искрения по трехбалльной системе (так же как и на американских заводах). На фиг. 99а схематически показан искрящий коллектор с оценкой баллами.

Искрение до *№ 2* включительно может быть признано допустимым.

Машина считается хорошей, если ее искрение оценивается баллом не ниже 1¼.

Балл *№ 1* означает совершенно безыскровую коммутацию, а баллом *№ 4* оценивается совершенно недопустимое, опасное искрение, могущее повредить коллектор машины.

§ 39. Удельная магнитная проводимость паза. Величина коэфициента самоиндукции L короткозамкнутой секции оказывает большое влияние на процесс коммутации в машинах постоянного тока.

Эта величина L зависит от числа витков w одной секции и

от величины магнитной проводимости Λ среды, окружающей секцию, и может быть выражена следующим образом:

$$L = w^2\Lambda. \qquad (39,1)$$

В свою очередь магнитная проводимость одной секции барабанной обмотки может быть выражена так:

$$\Lambda = 2l\lambda_{ж} + 2l_в\lambda_в, \qquad (39,2)$$

где l — длина якоря (за вычетом вентиляционных каналов), $l_в$ — длина торцовых соединений (фиг. 100) и $\lambda_{ж}$, $\lambda_в$ — физические коэфициенты, получаемые из опыта; $\lambda_{ж}$ равно по числовой величине тому числу силовых линий, которое образуется на протяжение 1 cm длины якоря вокруг проводника, заложенного в паз, когда по этому проводнику течет ток силой в 1 А; $\lambda_в$ по числовой величине равно числу силовых линий, которое образуется на протяжении 1 cm длины вокруг проводника, находящегося в воздухе, когда по этому проводнику течет ток силой в 1 А; согласно опытам Гобарта можно принять в среднем $\lambda_{ж} = 4$ и $\lambda_в = 0,8$; согласно опытам Пихельмайера получаются несколько меньшие средние величины

$$\lambda_{ж} = 3 \text{ и } \lambda_в = 0,6.$$

Подставляя (39,2) в (39,1), получаем

$$L = w^2 \cdot 2(l\lambda_{ж} + l_в\lambda_в),$$

или

$$L = w^2 \cdot 2l\left(\lambda_{ж} + \frac{l_в}{l}\lambda_в\right);$$

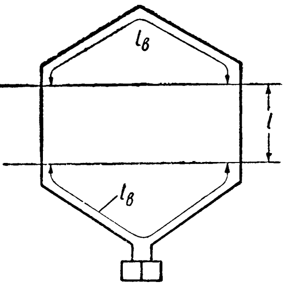
последнее равенство можно переписать так:

$$L = w^2 \cdot 2l \cdot \lambda, \qquad (39,3)$$

где

$$\lambda = \lambda_{ж} + \frac{l_в}{l}\lambda_в \qquad (39,4)$$

— так называемая расчетная удельная проводимость паза.



Фиг. 100. Секция петлевой обмотки.

Подставляя в это уравнение согласно опытам Гобарта и Пихельмайера $\lambda_{ж}$ и $\lambda_в$ и полагая, что для большинства обмоток $\frac{l_в}{l} \approx 2$ до 3, мы видим, что расчетная удельная магнитная проводимость паза для большинства машин должна колебаться в пределах

$$\lambda = 4 + (2 - 3) \cdot 0,8 = 5,6 - 6,4 \text{ (по Гобарту)}$$

и

$$\lambda = 3 + (2 - 3) \cdot 0,6 = 4,2 - 4,8 \text{ (по Пихельмайеру).}$$

Арнольд дает формулы, которые позволяют рассчитать величину λ, когда известны размеры паза.[1] В большинстве случаев, однако, бывает достаточным ограничиться применением формулы (39,4) и опытными данными Гобарта или Пихельмайера, имеющими приближенный характер.

§ 40. Ускоренная коммутация. На фиг. 91, *d* кривая *I* относится к случаю так называемой „замедленной“ коммутации.

[1] См. Арнольд, Динамомашины постоянного тока, т. I и II. Перевод под редакцией проф. Е. В. Нитусова.

Бывают случаи, о которых будет сказано ниже, когда добавочный ток имеет направление, обратное тому току i, который изображен на фиг. 91,b в виде сплошной кривой (пунктирная кривая, фиг. 91, b); при этих условиях получается так называемая „ускоренная" коммутация (см. кривую II на фиг. 91, d); в случае „ускоренной" коммутации ток в короткозамкнутой секции i переходит через нуль не при $t=\frac{T}{2}$, а несколько раньше: $t<\frac{T}{2}$, плотность тока под сбегающим краем щетки при ускоренной коммутации имеет уменьшенную величину, что ясно из сравнения углов, образованных касательными α_1 и α_2; под набегающим же краем плотность тока при этих условиях увеличивается. На фиг. 91, e примерная кривая распределения плотности тока в контакте щеток при „ускоренной" коммутации изображена в виде пунктирной кривой s'.

§ 41. Электродвижущая сила самоиндукции. Постараемся найти э. д. с. самоиндукции e, которая наводится в короткозамкнутой секции или витке благодаря изменению величины и направления текущего в ней тока:

$$e=L\frac{di}{dt}.$$

Вначале магнитным действием смежных проводников мы пренебрежем и для простоты предположим, что $\frac{di}{dt}=\text{const}$, т. е. что изменение тока i происходит по закону прямой линии, как это показано на фиг. 102; в этом случае э. д. с. e во время коммутации будет представлять собой постоянную величину.

Так как ток в короткозамкнутой секции за все время коммутации изменяется с $+i_a$ на $-i_a$, то мы можем написать, что в среднем

$$\frac{di}{dt}\approx\frac{+i_a-(-i_a)}{T}=\frac{2i_a}{T}.$$

Подставляя это выражение в вышенаписанное уравнение, получим

$$e=L\frac{2i_a}{T};$$

подставляя сюда

$$L=w^2\cdot 2l\cdot\lambda$$

и

$$T=\frac{b_D}{v},$$

получим

$$e=\frac{w^2\cdot 2l\cdot\lambda\cdot 2i_a\cdot v}{b_D}. \qquad (41,1)$$

Произведение $i_a w$, входящее в последнее выражение, представляет собой число ампервитков, соответствующее одной секции; мы можем написать

$$i_a w=i_a\frac{N}{2K}.$$

Так как $i_a N=\pi D\cdot AS=$ числу амперпроводов всей обмотки якоря, то

$$i_a w=\frac{\pi\cdot D\cdot AS}{2K}$$

или

$$i_a w=\frac{1}{2}\beta_D\cdot AS, \qquad (41,2)$$

где $\beta_D = \frac{\pi D}{K_1}$ равно приведенной ширине коллекторного деления (§ 32 обозначения).

Подставляя (41,2) в (41,1), получим окончательно

$$e = 2\frac{\beta_D}{b_D} \cdot w \cdot v \cdot AS \cdot l \cdot \lambda \cdot 10^{-8} \text{ вольт.} \tag{41,3}$$

Это уравнение дает возможность определить величину э. д. с. e, индуктированной в короткозамкнутой секции или витке вследствие изменения „собственного“ поля секции, не принимая во внимание явления взаимоиндукции между данной секцией и смежными секциями; ниже будет указано, как решается задача о нахождении э. д. с., действующих в короткозамкнутых секциях, принимая во внимание эти явления взаимоиндукции.

Уравнение (41,3) получено при условии „прямолинейной“ коммутации.

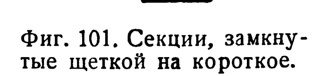
Точное решение задачи отыскания э. д. с. e в случае „криволинейной“ коммутации представляет большие математические трудности и приводит к очень сложным формулам, представляющим малое практическое значение.[1] Поэтому в таких случаях можно ограничиться определением средней величины э. д. с. самоиндукции за весь период коммутации T.

Так как среднее изменение тока в секции за весь период коммутации будет

$$+i_a - (-i_a) = 2i_a,$$

то средняя величина э. д. с. самоиндукции выразится уже знакомой нам формулой (41,3).

§ 42. Коммутация при $b > \beta$. Обычно в современнных динамомашинах ширина щетки бывает больше одного коллекторного деления, так что щетка обычно перекрывает не две, а несколько коллекторных пластин.



Фиг. 101. Секции, замкнутые щеткой на короткое.

В этом случае при прохождении через коммутационную зону не одна, а несколько секций находятся в состоянии короткого замыкания, и в каждой из этих секций в известной последовательности проходят все явления коммутации, рассмотренные нами в предыдущих параграфах.

Для пояснения на фиг. 101 показана граммовская обмотка с четырьмя шпулями (или секциями) *1-2-3-4*, замкнутыми на короткое щеткой в момент коммутации; при указанном на фиг. 101 направлении вращения якоря коммутация в этих четырех шпулях происходит в такой последовательности, что сначала замыкается на короткое шпуля *1*, затем шпули *2*, *3* и, наконец, *4*.

Все эти шпули в магнитном отношении связаны друг с другом (силовые магнитные линии одной шпули сцеплены с каждой из остальных шпуль, и наоборот; см. пунктир на фиг. 101); поэтому при определении э. д. с., действующих в короткозамкнутом контуре в момент коммутации, необходимо принимать в расчет не только э. д. с. самоиндукции e, но также и э. д. с. взаимоиндукции e_m.

Средняя величина э. д. с. самоиндукции e для того общего случая, когда ширина щетки b_D больше ширины коллекторного деления β_D, определится на основании формулы (41,3) таким образом:

$$e = \frac{1}{n} \cdot 2w \cdot v \cdot AS \cdot l \cdot \lambda \; 10^{-8} \text{ вольт,} \qquad (42,1)^2$$

$$n = \frac{b_D}{\beta_D}.$$

[1] См. Арнольд, Динамомашины постоянного тока, т. I.

[2] Формула (42,1) дает величину э. д. с., индуктированной в короткозамкнутой секции ее собственным магнитным полем без учета влияния взаимоиндукции от смежных секций; как учитывается влияние последних, сказано ниже в § 44.

Результирующая э. д. с. e_{max}, индуктированная в какой-нибудь короткозамкнутой секции, будет представлять собой сумму э. д. с. взаимоиндукции e_m и э. д. с. самоиндукции e:

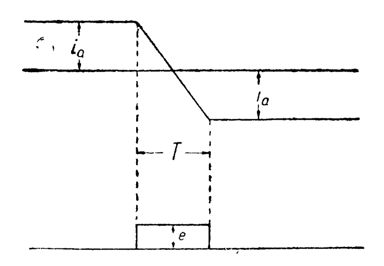
$$e_{max} = \Sigma (e + e_m).$$

В дальнейшем эту э. д. с. e_{max} будем вызывать реактивным напряжением в отличие э. д. с. самоиндукции e, вызываемой изменением „собственного" поля данной секции.

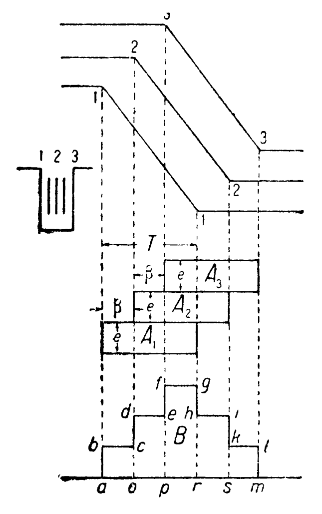
Для упрощения письма в дальнейшем вместо e_{max} будем иногда обозначать реактивное напряжение через e_r.

§ 43. Реактивное напряжение.[1] При определении величины реактивного напряжения мы предполагаем, что изменение тока в короткозамкнутой секции в момент коммутации происходит по закону прямой линии.

Такое допущение сильно упрощает задачу, так как величина э. д. с. самоиндукции e, индуктированной изменением тока в проводах, остается при таких условиях во все время коммутации постоянной, как это показано внизу на фиг. 102. Кривая результирующей э. д. с., индуктированной в проводах обмотки якоря в момент коммутации, будет заметным образом отличаться от прямоугольной



Фиг. 102. Кривая э. д. с. самоиндукции e при прямолинейной коммутации.



Фиг. 103. Кривая реактивного напряжения B.

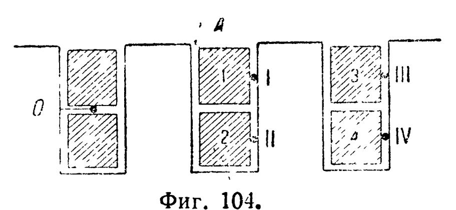
формы, показанной на фиг. 102 вследствие взаимной индукции проводов, лежащих как в одном и том же канале, так и в каналах смежных.

Предполагая приближенно, что коэфициент взаимной индукции для проводов, лежащих в одном канале рядом, равен 1, можно определить э. д. с., индуктированную в каждом проводе в период коммутации так, как это показано на фиг. 103; на этой

[1] Материалом для излагаемой далее в § 43 теории коммутации послужили следующие статьи автора: 1) „Commutation in Direct-Current Machines" by Prof. Claudius Schenfer (Journal of the Amerikan Institute of Electrical Engineers, 1921, November). 2) Die Abhängigkeit der Reaktanzspannung von Bürstenbreite bei Gleichstrommaschinen", Prof. Cl. Schenfer (Elektrotechnische Zeitschrift № 16, 1923. 3) „Коммутация в машинах постоянного тока" (Труды Государственного экспериментального электротехнического института, вып. 1, 1924).

фигуре для примера показано построение для зубчатого граммовского якоря с тремя проводами в одном пазу при $b=\beta$. Из этой фигуры видно, что сначала замыкается щеткой на короткое виток, образованный проводом *1*, причем в нем происходит изменение тока по кривой *1-1*; затем, спустя промежуток времени, соответствующий перемещению коллектора на одно коллекторное деление β, происходит коммутация в проводе *2* и, наконец, в проводе *3*; э. д. с. самоиндукции, вызванные изменением собственных магнитных потоков в проводах *1*, *2* и *3*, изображены на фиг. 103 в виде прямоугольников A_1, A_2, A_3, смещенных друг относительно друга на величину β; для получения результирующей э. д. с. (реактивного напряжения) необходимо сложить ординаты всех трех кривых A_1, A_2 и A_3; в результате этого построения получается ступенчатая кривая B — кривая реактивного напряжения; кривая э. д. с., индуктированной в первом проводе, изобразится ступенчатой кривой *abcdefgr*; кривая э. д. с. второго провода — *odefghis*, для провода третьего получится кривая *pfghiklm*.

Таким образом максимальная величина реактивного напряжения e_{max} при условиях фиг. 103 будет $e_{max}=3e$. Величина э. д. с. самоиндукции e, индуктированной в одной секции или витке, может быть определена по формуле (42,1), которая может быть применена для барабанной и для граммовской обмоток.[1]



Фиг. 104.

§ 44. Явления взаимоиндукции при коммутации. При барабанном якоре мы имеем дело в большинстве случаев с двухслойными обмотками, в которых должна быть учтена взаимная индукция проводов, не только лежащих в одном пазу рядом, но также проводов, лежащих один под другим в разных слоях обмотки. Назовем через e_1 э. д. с. самоиндукции в проводах первого верхнего слоя (*1*, фиг. 104) и через e_2 — э. д. с. самоиндукции провода второго нижнего слоя (*2*, фиг 104); разница между величинами e_1 и e_2 объясняется разной величиной магнитной проводимости паза для проводов, лежащих в верхней и нижней частях его; согласно опытам автора это отношение в среднем может быть принято приблизительно

$$e_2 : e_1 = 2,3.$$

Кроме э. д. с. самоиндукции e_1 и e_2 при барабанной двухслойной обмотке необходимо еще различать следующие э. д. с. взаимоиндукции:

а) э. д. с., действующие в проводе *1*:

---

[1] Действительно, для граммовской обмотки, у которой число коллекторных пластин равно числу секций, мы имеем $i_a w = \beta \cdot AS$. Кроме того, для граммовской обмотки, каждая секция которой имеет не две, а одну секционную сторону, мы можем написать $\Lambda = w^2 \cdot l\lambda$; подставляя эти два выражения в уравнение $e = L\,\frac{2i_a}{T}$, мы получаем формулу (42,1). Так как для граммовской обмотки отношение $\frac{l_b}{l}$ значительно больше, чем для барабанной, то λ для первой обмотки имеет вообще большую величину, чем для второй.

1) э. д. с. взаимоиндукции между проводами *2-1*, лежащими в одном и том же пазу (фиг. 104), $k_{21} \cdot e_2$;

2) э. д. с. взаимоиндукции между проводами *3-1*, лежащими в смежных пазах, $k_{31} \cdot e_1$;

3) э. д. с. взаимоиндукции между проводами *4-1*, лежащими в смежных пазах $k_{41} \cdot e_2$;

b) э. д. с., действующие в проводе *2*:

1) э. д. с. взаимоиндукции между проводами *1-2*, лежащими в одном и том же пазу, $k_{12} \cdot e_1$;

2) э. д. с. взаимоиндукции между проводами *3-2*, лежащими в смежных пазах, $k_{32} \cdot e_1$;

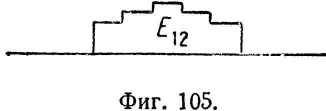
3) э. д. с. взаимоиндукции между проводами *4-2*, лежащими в смежных пазах, $k_{42} \cdot e_1$.

На фиг. 105 показан графический способ построения результирующей э. д. с., действующей в короткозамкнутой секции для случая, когда в каждом пазу лежит шесть проводов и когда ширина щетки равна ширине трех коллекторных делений ($n = 3$).

При условии прямолинейной коммутации кривая всех перечисленных выше э. д. с. самоиндукции и взаимоиндукции представится в виде прямоугольников разной высоты, но с одинаковым основанием, равным при некотором масштабе ширине щетки; все эти прямоугольники на фиг. 105 изображены смещенными друг относительно друга на величину одного коллекторного деления β; складывая ординаты этих прямоугольников, мы можем найти результирующую э. д. с.

На фиг. 105 ступенчатая кривая E_{11} представляет собой кривую результирующей э. д. с., индуктированной в проводах в е р х н е г о слоя изменением магнитного потока в е р х н и х же проводов; E_{21} — кривая результирующей э. д. с., индуктируемой в проводах в е р х н е г о слоя, изменением тока в проводах н и ж н е г о слоя. E_{22} — кривая результирующей э. д. с. проводов н и ж н е г о слоя, вызванная проводами нижнего же слоя; E_{12} — кривая результирующей э. д. с. проводов н и ж н е г о слоя, вызванная проводами в е р х н е г о слоя.

В случае обмотки с малым укорочением $\left(\text{когда } y_1 = \frac{K}{p} + 1 \text{ и } \frac{K}{2p} \text{ равно целому числу}\right)$[1] кривые $E_{11}, E_{21}, E_{22}, E_{12}$ совпадают между собой



Фиг. 105.

обмотки, для которой соблюдены условия:

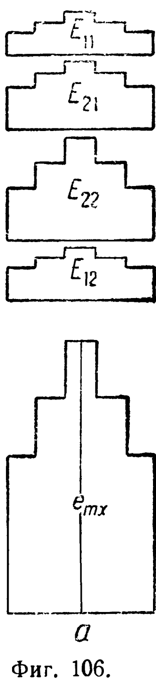
$$y_1 = \frac{K}{p} + 1;$$

$$\frac{K}{2p} = \text{целому числу}.$$

[1] В этом случае в каждом из проводов верхнего слоя коммутация совершается одновременно с соответственным проводом нижнего слоя. В этом можно убедиться, рассматривая на частном примере ту последовательность, с какой происходит коммутация в двух лежащих друг над другом проводах какой-нибудь

по фазе, результирующая же э. д. с., индуктированная в короткозамкнутой секции, получается суммированием соответственных ординат вышеозначенных кривых, как это показано на фиг. 106. При построении фиг. 105 и 106 были приняты для коэфициентов э. д. с. следующие значения, полученные на основании опытов автора:

$$k_{21} = 0{,}70; \quad k_{31} = 0{,}28; \quad k_{41} = 0{,}28;$$
$$k_{12} = 1{,}20; \quad k_{32} = 0{,}50; \quad k_{42} = 0{,}30;$$
$$e_2 : e_1 = 2{,}30.$$



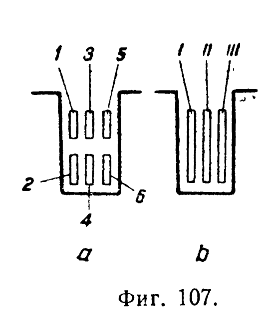
Фиг. 106.

Из фиг. 106 можно усмотреть еще следующее важное в теории коммутации обстоятельство: оказывается, что реактивные напряжения в верхнем и нижнем проводах одной секции неодинаковы по величине; э. д. с., индуктированная в верхнем проводе *1* (фиг. 107), получается путем сложения ординат кривых E_{11} и E_{21}, э. д. с., индуктированная в нижнем проводе *2*, — путем сложения кривых E_{22} и E_{12} (максимальная ордината которых, как видно из фиг. 106, в среднем больше, чем максимальная ордината кривых E_{21} и E_{11}).

Отношение между этими двумя результирующими величинами реактивного напряжения согласно опытам автора с двигателем Ламайера, о котором будет сказано ниже, оказалось равным приблизительно 1,40. Из сказанного ясно, что в машинах с увеличенным вдвое числом коллекторных пластин (т. е. с числом витков в одной секции, равным $^1/_2$) невозможно получить при помощи дополнительных полюсов хорошую коммутацию для всех секций обмотки якоря.

При машинах с нормальным числом коллекторных пластин магнитное поле дополнительных полюсов должно быть такое, чтобы была компенсирована в с р е д н е м сумма реактивных напряжений верхнего и нижнего проводов короткозамкнутой секции.

§ 45. Обмотки с малым укорочением шага. Когда частичный шаг обмотки и число коллекторных пластин удовлетворяют тому условию, что $y_1 = \frac{K}{p} + 1$ и $\frac{K}{2p}$ = целому числу, то в этом случае в каждом из проводов, лежащих в верхней части паза, коммутация тока происходит одновременно с таковой для соответственного провода, лежащего в нижней части того же паза.[1] Поэтому в этом случае для упрощения задачи мы можем предположить каждый из верхних проводов паза слитым с соответствующим нижним проводом паза и рассматривать вместо паза *a* (фиг. 107) паз *b* с половинным числом проводов.



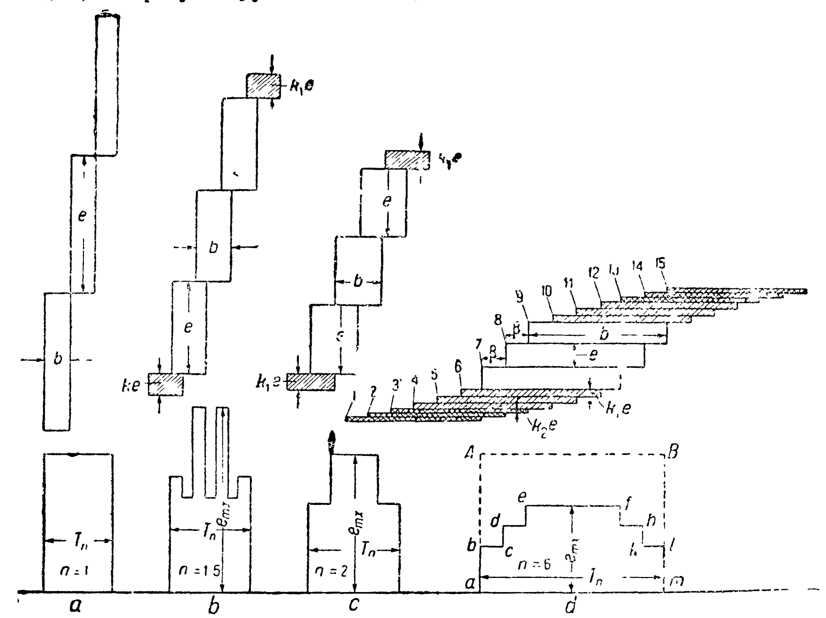
Фиг. 107.

На фиг. 108 показан ряд построений для якоря с шестью проводами в одном пазу (или тремя „слитыми" проводами). Фиг. 108, *a*, *b*, *c*, *d* относятся к тому случаю, когда число коллекторных пластин, перекрываемых щеткой, соответственно равно $n = 1$; 1,5; 2 и 6.

В случае барабанных обмоток с сильно укороченным шагом, когда $\frac{K}{p} + 1 > y_1$, построение результирующих кривых э. д. с. усложняется благодаря тому обстоятельству, что теперь э. д. с., наведенные в проводах верхнего и нижнего слоев обмотки якоря, не совпадают по фазе. Во всех современных обмотках укорочение шага обычно бывает очень небольшим, ввиду этого мы здесь такого случая не рассматриваем.

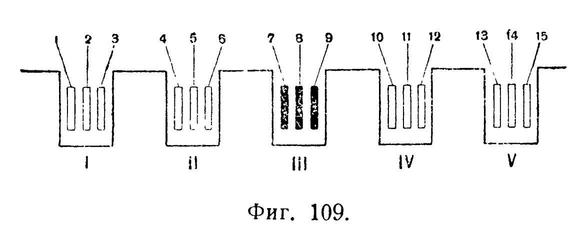
[1] В этом можно убедиться, рассматривая короткозамкнутые секции в момент коммутации при разных положениях щетки относительно коллекторных пластин.

При обмотке с неукороченным шагом коммутация тока в каком-нибудь проводе **верхнего слоя** и расположенного под этим проводом другого провода **нижнего слоя** происходит одновременно. Учитывая явление взаимоиндукции, мы видим, что результирующая э. д. с. (самоиндукции и взаимоиндукции) в таком



Фиг. 108. Кривые результирующей э. д. с. (внизу) при различном числе перекрытых щеткой пластин. [1]

случае возрастает приблизительно вдвое по сравнению с обмотками, имеющими значительное укорочение шага. Исходя из этого, для упрощения задачи вместо паза *a* на фиг. 107 с шестью проводами можно рассматривать **эквивалентный паз** с тремя **слитыми** проводами (паз *b* на фиг. 107).



Фиг. 109.

Таким образом э. д. с. в каждом слитом проводе *e* будет соответствовать э. д. с. одного витка или секции двухслойного якоря.

Отсюда видно, что приводимые фиг. 108 и 109 в сущности могут быть отнесены также и к граммовскому якорю, у которого в каждой секции имеется не **две**, а **одна** секционная сторона.

На фиг. 108 справа прямоугольники *7*, *8* и *9* представляют собой кривые э. д. с. **самоиндукции**, индуктированных в слитых проводах *7*, *8* и *9* (фиг. 109) в тот момент, когда в последних совершается коммутация тока.

Результирующая э. д. с. e_{max}, индуктированная в каком-нибудь слитом проводе, лежащем в канале *III* (фиг. 109), будет больше, чем э. д. с. самоиндук-

[1] На фиг. 108 величина T_n есть „время короткого замыкания одного паза"; другими словами, это есть время, протекшее между началом короткого замыкания первого провода, лежащего в каком-нибудь канале (например, провода *1* на фиг. 107, *a*), и концом короткого замыкания последнего провода того же паза (например, провода *6* на фиг. 107, *a*).

ции e благодаря взаимной индукции других проводов, лежащих как в том же канале *III*, так и в смежных каналах *II*, *I* и *IV*, *V*; влияние проводов, лежащих в смежных каналах, можно учесть, производя построение прямоугольников с уменьшенной ординатой $k_1 \cdot e$ и смещенных один относительно другого на величину коллекторного деления β; влияние проводов *1, 2, 3* и *13, 14, 15* (фиг. 109), расположенных в более дальних каналах относительно рассматриваемого, можно учесть, таким образом, графически, путем построения прямоугольников э. д. с. *1, 2, 3* и *13, 14, 15* (фиг. 108) с ординатами $k_2 \cdot e$.

На основании опытов автора выяснилось, что в среднем $k_1 = 0{,}28$ и $k_2 = 0{,}13$.

Таким образом получается кривая результирующей э. д. с. *abcdefhklm* (фиг. 108, *d*), индуктированной в каком-нибудь проводе, когда последний при вращении якоря перемещается через коммутационный пояс. На фиг. 108, *a*, *b*, *c* показаны кривые реактивного напряжения при ширинах щетки $\frac{b}{\beta} = n = 1$; $n = 1{,}5$ и $n = 2$.

Постараемся найти выражение для максимальной величины этой результирующей э. д. с. e_{max}. Назвав через e э. д. с. самоиндукции, индуктированную в слитом проводе путем изменения собственного потока провода, согласно фиг. 108, *d* мы получим $e_{max} = 3e + 3k_1 \cdot e$; вообще мы можем написать

$$e_{max} = n_t \cdot e + (n - n_t)k_1 \cdot e, \qquad (45{,}1)$$

где n — число коллекторных делений, перекрытых щеткой, и n_t — число делений, приходящихся на один паз; формула (45,1) верна только для значений $n \gg n_t$; при дробных значениях n разность $(n - n_t)$, входящая в выражение (45,1), должна быть округлена до ближайшего большего целого числа; назвав последнюю величину через N, перепишем уравнение (45,1) так:

$$e_{max} = n_t \cdot e + Nk_1 \cdot e = (n_t + Nk_1)\, e \qquad (45{,}2)$$

(при целых значениях n величина N, входящая в (45,1), принимается равной $n - n_t$).

При $n < n_t$ и при дробных значениях максимальная величина реактивного напряжения может быть на основании фиг. 108, *d* хорошо выражена следующей формулой:

$$e_{max} = N_1 \cdot e, \qquad (45{,}3)$$

где N_1 — ближайшее целое, бо́льшее, число к n [при целых числах n входящая в (45,1) величина N_1 принимается равной n].

Подставляя в уравнение (45,2) и (45,3) выражение для e' из уравнения (41,3), находим

$$e_{max} = (n_t + Nk_1)e$$

или

$$e_{max} = \left[\frac{n_t}{n} + \frac{N}{n}k_1\right] 2w \cdot v \cdot AS \cdot \lambda \cdot l \cdot 10^{-8} \text{ (при } n \gg n_t) \qquad (45{,}4)$$

и

$$e_{max} = \left[\frac{N_1}{n}\right] 2w \cdot v \cdot AS \cdot \lambda \cdot l \cdot 10^{-8} \text{ (при } n < n_t); \qquad (45{,}5)$$

таким образом мы можем написать

$$e_{max} = C \cdot 2w \cdot v \cdot AS \cdot \lambda \cdot l \cdot 10^{-8}, \qquad (45{,}6)$$

где

$$C = \frac{n_t}{n} + \frac{N}{n} k_1 \text{ при значениях } n \gg n_t \qquad (45{,}7)$$

и

$$C = \frac{N_1}{n} \text{ при значениях } n < n_t. \qquad (45{,}8)$$

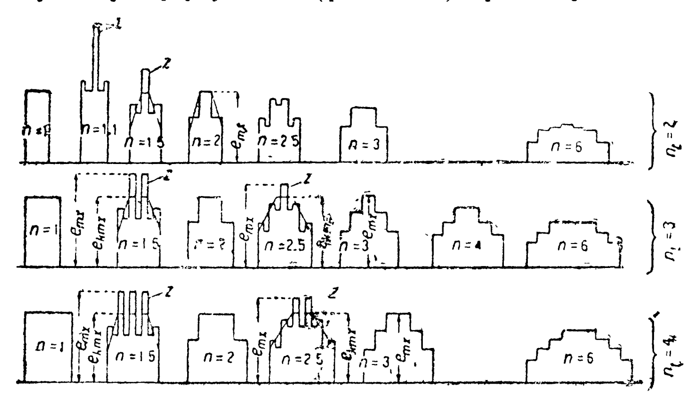
Полученная нами формула (45,6) отличается от известной формулы профессора Пихельмайера множителем C. Для того идеального, не существующего на практике, случая, когда $k_1 = k_2 = 1$, т. е. когда коэфициент взаимной индукции

между проводами, лежащими в различных каналах, равняется единице, наша формула (45,6) принимает следующий простой вид:

$$e_{max} = ne;$$

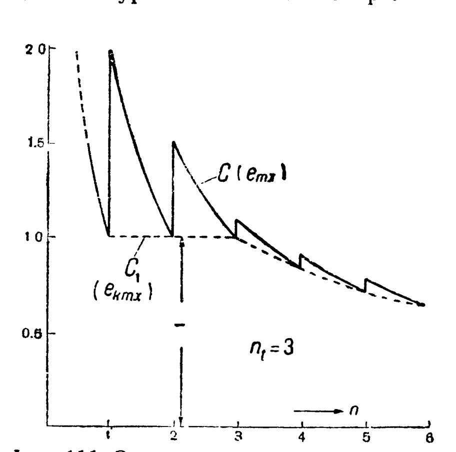
$$e_{max} = 2w \cdot v \cdot AS \cdot \lambda \cdot l \cdot 10^{-8}. \qquad (45,9)$$

В этом случае вместо ступенчатой кривой реактивного напряжения мы получаем прямоугольную форму *aABm* (фиг. 108, *d*), при которой максимальное и

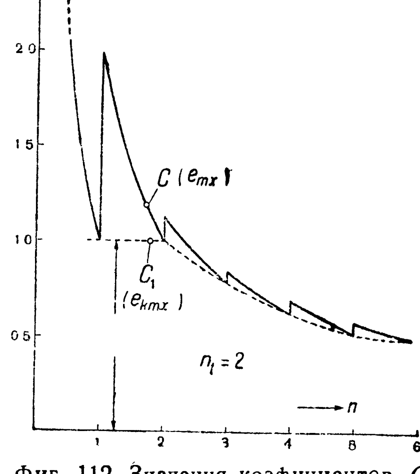


Фиг. 110. Кривые реактивного напряжения при $n_t = 2$, 3 и 4 и при различных числах перекрытых щеткой пластин $n = 1$, 2, 3, . . . 6.

среднее значения реактивного напряжения совпадают; для этого идеального случая коэфициент C, входящий в уравнение (45,6), делается равным единице, и уравнение автора этой книги превращается в уравнение Пихельмайера.



Фиг. 111. Значения коэфициентов C и C_1 при разных значениях n для случая, когда $n_t = 3$.



Фиг. 112. Значения коэфициентов C и C_1 при разных значениях n, когда $n_t = 2$.

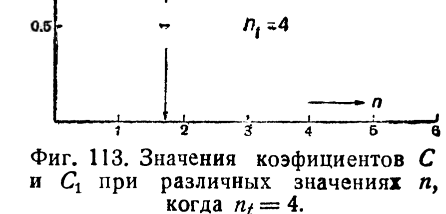
Относительно правильности формулы Пихельмайера в технической литературе[1] существовал сильный спор; наибольшее сомнение вызывало отсутствие в формуле Пихельмайера ширины щетки.

[1] См. Elektrotechnische Zeitschrift, 1912, 3, 266, 523, 524 и 602.

Одна группа ученых с Пихельмайером во главе полагала, что средняя величина реактивного напряжения не зависит практически от числа перекрытых щеткой коллекторных пластин и что поэтому при расчетах коммутации можно пользоваться формулой Пихельмайера, в которую ширина щетки не входит.

Другая группа (Нитгаммер, Ламме) полагает, что этой зависимостью между величиной реактивного напряжения и шириной щетки при расчетах коммутации пренебрегать нельзя.

Как будет показано ниже, и та и другая группа ученых в известной степени оказалась правой; ниже автору этой книги удалось показать, что при малых ширинах щетки, когда $n < n_t$, при расчетах дополнительных полюсов можно пользоваться формулой Пихельмайера, при больших ширинах щетки $(n > n_t)$ необходимо в формулу Пихельмайера вводить некоторый поправочный множитель C. По способу, указанному выше, были построены кривые реактивного напряжения для различных случаев: $n_t = 2, 3, 4$ и $n = 1, 2, 3, \ldots, 6$; для того чтобы не загромождать книги чертежами, на фиг. 110 приведен только результат этого построения; из этой фигуры видно, что при увеличении ширины щетки, как, это и следует согласно формуле (456), e_{max} убывает, при значениях $n < n_t$ в кривых реактивного напряжения появляются острые зубцы Z, которые, как будет показано ниже, оказывают вредное влияние на коммутацию; при постепонном уменьшении ширины щетки высота этих зубцов Z увеличивается, а ширина их уменьшается, так что в пределе при целом числе перекрытых пластинок зубцы превращаются в прямую линию (ср., например, зубцы Z для $n = 1{,}5$ и $n = 1{,}1$ при $n_t = 2$, фиг. 110).



Фиг. 113. Значения коэфициентов C и C_1 при различных значениях n, когда $n_t = 4$.

На основании вышеуказанного графического построения зависимость между e_{max} и числом перекрытых щеткой пластин n построена в прямоугольных координатах на фиг. 111, 112 и 113 для случаев $n_t = 2$, 3 и 4; как видно из этих фигур, эта зависимость получается в виде зубчатых кривых, приближающихся к оси абсцисс с увеличением n; из фиг. 111 и 113 видно, что при значениях $n \geq n_t$ зубцы кривых делаются меньше, чем при малых значениях $n < n_t$.

§ 46. Неодинаковые условия коммутации в разных секциях. На коллекторе машины после длительной работы иногда наблюдаются почернения некоторых коллекторных пластин, находящихся в правильном чередовании с непочерневшими пластинами.

Причина этого явления заключается в том, что отдельные секции, заложенные в пазы, находятся в неодинаковых условиях коммутации.

В самых трудных условиях коммутации находятся те секции, которые последними в пазу выходят из состояния короткого замыкания. Поэтому коллекторные пластины, соединенные с этими секциями, обычно искрят больше, чем остальные.

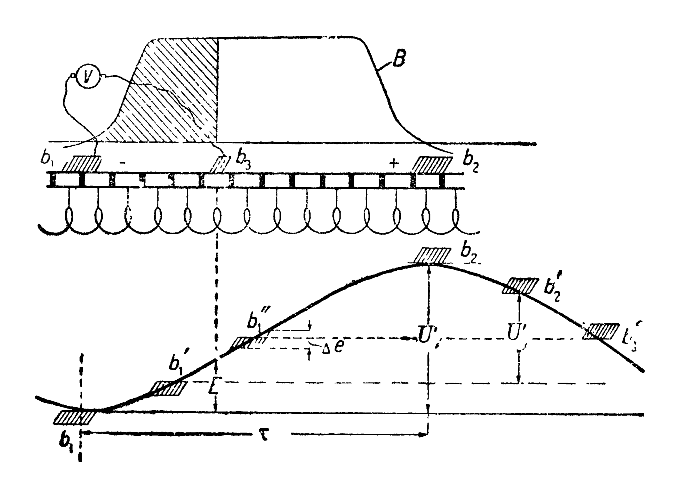
Соседние секции данного паза, замкнутые на короткое щеткой, являются своего рода демпферами, заглушающими, уменьшающими э. д. с., наводимые в секции в момент коммутации.

Однако та секция, которая в пазу последней выходит из состояния короткого замыкания, рядом с собой в пазу уже не

имеет короткозамкнутых секций: демпфирующее действие отсутствует и э. д. с. самоиндукции в этой секции достигает большого значения.

Таким образом в машине с числом проводов в пазу $u_n=6$ приходится иногда наблюдать почернение при каждой третьей и при $u_n=8$ почернение каждой четвертой пластины и т. д.

§ 47. Разность потенциалов между двумя смежными коллекторными пластинами. В простой параллельной обмотке каждая ее секция присоединяется к двум смежным коллекторным пластинам; поэтому разность потенциалов между этими



Фиг. 114. Потенциальная диаграмма на коллекторе (внизу) и кривая магнитной индукции в воздушном зазоре B.

пластинами должна быть равной той э. д. с., которая индуктируется в одной секции. Так как каждая секция при вращении обмотки якоря пересекает силовые линии разной густоты в зависимости от положения секции относительно полюсов возбуждения, то э. д. с., индуктированная в секции, должна иметь также переменную величину, и форма ее кривой должна совпадать с формой распределения магнитной индукции в воздушном зазоре. [1]

На фиг. 114 показана кривая распределения магнитной индукции B в воздушном зазоре; разность потенциалов между какой-нибудь одной парой пластин при их перемещении в пространстве изобразится примерно такой же кривой B.

Средняя величина разности потенциалов между двумя смежными пластинами $e_{ср}$ может быть определена следующим образом:

---

[1] При условии, что частичные шаги обмотки очень близки по своей величине к полюсному делению τ.

Между двумя смежными щетками разноименной полярности заключается

$$\frac{K}{2p} \text{ пластин.}$$

Искомая величина e_{cp} определится делением напряжения машины U на это число пластин:

$$e_{cp} = U : \frac{K}{2p} = \frac{2p\,U}{K}. \qquad (47,1)$$

Максимальная разность потенциалов между двумя смежными пластинами возникает всякий раз, когда соответствующая им секция пересекает силовые линии наибольшей густоты.

При холостом ходе машины кривая поля B имеет примерный вид, показанный на фиг. 114; такую же форму имеет кривая разности потенциалов между смежными пластинами; поэтому, имея в виду, что

$$\frac{B_{cp}}{B_{\max}} \approx \frac{b}{\tau} \approx \alpha,$$

мы можем написать

$$\frac{e_{cp}}{e_{\max}} = \frac{B_{cp}}{B_{\max}} = \alpha,$$

откуда

$$e_{\max} = \frac{e_{cp}}{\alpha} = \frac{2pU}{\alpha \cdot K}. \qquad (47,2)$$

При нагрузке кривая поля вследствие реакции якоря деформируется; таким же образом искажается и кривая разности потенциалов между смежными пластинами, поэтому отношение $\frac{e_{\max}}{e_{cp}}$ с возрастанием нагрузки увеличивается; назвав это отношение при нагрузке через $\frac{1}{\alpha_H}$, можем написать

$$e_{\max} = \frac{2p\,U}{\alpha_H \cdot K}. \qquad (47,3)$$

Обычно при холостом ходе мы имеем $\frac{1}{\alpha} \approx 1{,}5$ до 1,4; при нагрузке обычно получаются разные отношения $\frac{e_{\max}}{e_{cp}}$ в зависимости от величины реакции якоря; в среднем можно принять, что $\frac{e_{\max}}{e_{cp}} = 1{,}8$ до 2,4.

Допускаемая величина напряжения между пластинами (круговое искрение). Если медные коллекторные пластины изнашиваются скорее, чем слюдяная изоляция между ними, то благодаря образовавшимся при этом слюдяным выступам между некоторыми коллекторными пластинами начинают очень быстро истираться поверхности угольных щеток; в результате этого изоляционные прослойки между смежными пластинами покрываются проводящей угольной пылью, и под влиянием разности потенциалов между смежными коллекторными

пластинами эта проводящая пыль начинает выгорать и коллектор начинает искрить; наибольшее искрение наблюдается в тех местах коллектора, которые соответствуют месту наибольшей магнитной индукции под полюсами.

Искрение описанного здесь рода наблюдается на самом коллекторе машины и достигает, как было только что сказано, максимальной силы в месте наибольшей густоты силовых линий главного поля; оно отличается в этом отношении от искрения другого рода, которое наблюдается в нейтральной зоне под самыми щетками; об искрении этого рода была уже речь выше, в § 36.

Искрение первого рода, как показали опыты Ламме,[1] является совершенно безопасным для коллектора, пока максимальная разность потенциалов между смежными пластинами не превышает примерно величины $e_{max} = 28$ V.

При бо́льших напряжениях раз образовавшиеся благодаря проводящей угольной пыли вольтовы дуги между смежными пластинами делаются очень устойчивыми, что может повлечь за собой при известных условиях так называемое круговое искрение; это явление заключается в том, что по всей поверхности коллектора образуется вольтова дуга, которая перекидывается от одного щеткодержателя к другому разноименному.

Круговое искрение представляет собой опасное явление, так как часто влечет за собой полную порчу коллектора. Во избежание этого коллектор динамомашины постоянного тока приходится так рассчитывать, чтобы величина e_{max} при полной нагрузке машины не переходила безопасных норм.[2]

§ 48. Потоки, создаваемые короткозамкнутой секцией. На фиг. 115 показана секция, короткозамкнутая щеткой, и поток рассеяния, создаваемый такой секцией, когда она обтекается током.

Как видно из фиг. 115, силовые линии потока секции замыкаются поперек паза и вокруг торцевых частей секции.

Найдем величину потока для паза и отдельно — для торцевых частей секций.

Как показано на фиг. 115, левая секционная сторона витка занимает верхнюю часть паза, а правая сторона — нижнюю часть.

„Пазовый“ поток секции. Найдем величину потока в пазу для левой (верхней) секционной стороны при токе, равном 1 A, и на протяжении 1 cm длины, т. е. найдем величину удельной магнитной проводимости;

$$\lambda_{n_1} = 1{,}25 \frac{r}{3b_n},$$

где b_n — ширина паза и

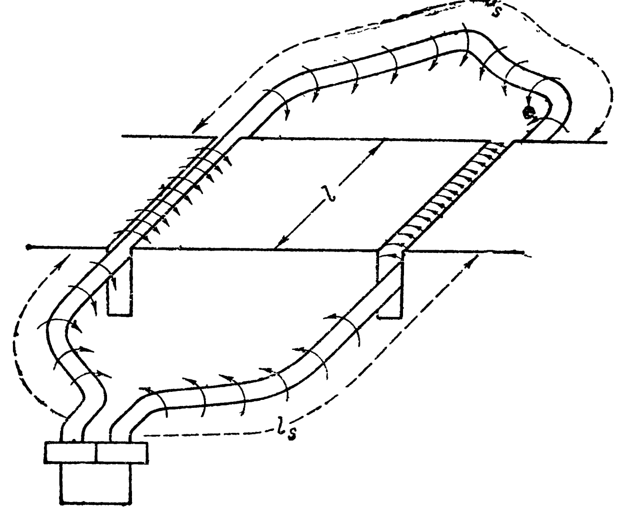
r — высота пучка проводов секции (фиг. 116).

[1] Proceedings of the American Institute of Electrical Engineers, 1915.

[2] Подробно см. § 22, Высоковольтные машины.

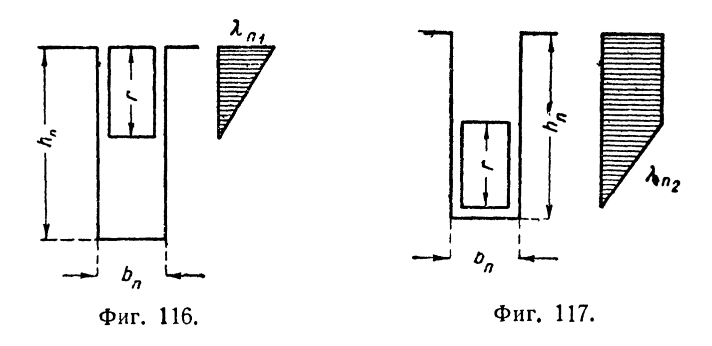
Для правой секционной стороны (расположенной внизу паза) найдем (фиг. 116)

$$\lambda_{n2} = 1{,}25\left(\frac{r}{3b_n} + \frac{r}{b_n}\right) = 1{,}25\ \frac{4r}{3b_n}.$$



Фиг. 115.

На фиг. 116, 117 справа показаны кривые распределения магнитной индукции в пазу, создаваемой пучками проводов, лежащих вверху паза и внизу.



Фиг. 116.

Фиг. 117.

Если в секции, показанной на фиг. 115, будет протекать ток силой в 1 А, то величина потока (по численной величине равная коэфициенту магнитной проводимости) будет равна

$$\lambda = \lambda_{n_1} l + \lambda_{n_2} \cdot l = (\lambda_{n_1} + \lambda_{n_2})\, l.$$

Найдем число амперпроводов или магнитнодвижущую силу, создаваемую пучком проводов одной секционной стороны короткозамкнутой секции:

$$\text{м. д. с.} = \frac{1}{2} b_D AS,$$

где b_D — ширина щетки, приведенная к окружности якоря и равная

$$b_D = b\frac{D_a}{D_k}.$$

При двухслойной обмотке каждая секция располагается в пазах якоря таким образом, что одна секционная сторона ее занимает верхнее положение в пазу, а другая располагается внизу другого паза.

Пазовый поток, создаваемый верхним пучком проводов, будет

$$\Phi_{n_1} = \frac{1}{2} b_D AS \cdot l \cdot \lambda_{n_1}.$$

Пазовый поток нижнего пучка проводов выразится

$$\Phi_{n_2} = \frac{1}{2} b_D \cdot AS \cdot l \cdot \lambda_{n_2}.$$

Пазовый поток, создаваемый всей секцией, будет

$$\Phi_{n_1} + \Phi_{n_2} = \frac{1}{2} b_D \cdot AS \cdot l (\lambda_{n_1} + \lambda_{n_2}).$$

При „диаметральной“ обмотке, или обмотке с малым укорочением шага, процессы изменения тока в проводах пучка проводов, заложенных в паз, в момент коммутации будут совершаться приблизительно одновременно. Таким образом процессы коммутации тока будут происходить одновременно во всех проводах верхнего и нижнего слоя данного паза. Поэтому расчетную величину пазового потока рассеяния, сцепленного с короткозамкнутыми витками, в момент коммутации следует удвоить, в результате чего получится результирующая величина пазового потока секции:

$$\Phi_n = 2(\Phi_{n_1} + \Phi_{n_2}) = b_D \cdot AS \cdot l (\lambda_{n_1} + \lambda_{n_2}).$$

В эту формулу можно ввести среднюю величину удельной магнитной проводимости паза

$$\frac{\lambda_{n_1} + \lambda_{n_2}}{2} = \lambda_n,$$

откуда

$$\lambda_{n_1} + \lambda_{n_2} = 2\lambda_n.$$

Подставляя последнее выражение в формулу для потока Φ_n, найдем окончательно

$$\Phi_n = b_D \cdot AS \cdot l(\lambda_{n_1} + \lambda_{n_2}),$$
$$\Phi_n = b_D \cdot AS \cdot l \cdot 2\lambda_n.$$

Поток магнитного рассеяния головок зубцов. Когда паз с коммутируемым пучком проводов располагается в коммутационной зоне, поток рассеяния Φ_Z по выходе из зубцов замыкается поперек полюсного наконечника дополнительного полюса.

Поток, приходящийся на обе секционные стороны, будет вдвое большим, т. е. будет равен $2\,\Phi_Z$.

Поток Φ_Z колеблется с частотой коммутации и наводит в полюсном башмаке D дополнительного полюса вихревые токи, которые оказывают демпфирующее действие и частично заглушают колебания потока Φ_Z при вращении якоря.

Средняя удельная магнитная проводимость паза, соответствующая потоку Φ_Z, является величиной, обратно пропорциональной величине воздушного зазора δ_k под дополнительным полюсом, и величиной, прямо пропорциональной ширине башмака дополнительного полюса b_d, т. е. мы можем написать

$$\lambda_Z = C \cdot \frac{b_d}{\delta_k'},$$

где C — постоянная;

δ_k' — приведенный воздушный зазор под дополнительным полюсом, равный $k_1\,\delta_k$.

Суммарный поток рассеяния головок зубцов, замыкающийся через башмак дополнительного полюса, таким образом будет $\Phi_Z = b_d\ AS \cdot l \cdot 2\lambda_Z$.

Инж. С. Б. Юдицкий в ВЭИ экспериментально нашел среднюю[1] величину коэфициента C с учетом демпфирующего действия токов Фуко в полюсном наконечнике

$$C \approx 0{,}15.$$

Таким образом формула для подсчета средней величины удельной магнитной проводимости рассеяния головок зубцов при наличии дополнительных полюсов примет вид

$$\lambda_Z \approx 0{,}15\ \frac{b_d}{\delta_k'}.$$

Например, при $b_d = 3$ cm, $\delta_k' = 5$ mm получим

$$\lambda_Z = 0{,}15\ \frac{3}{0{,}5} = 0{,}9.$$

---

[1] При вращении якоря меняется положение зубцов якоря относительно башмака дополнительного полюса; поэтому величина магнитной проводимости головок зубцов периодически колеблется.

Для упрощения задачи приходится в расчет вводить среднюю величину магнитной проводимости λ_Z.

§ 49. Суммарный поток, создаваемый короткозамкнутой секцией. На основании предыдущих разделов можем найти сцепленный с короткозамкнутыми коммутируемыми секциями суммарный поток, являющийся суммой трех потоков: пазового потока (Φ_n); „торцевого“ потока (Φ_b); потока головок зубцов (Φ_Z). Таким образом получаем

$$\Phi_S = \Phi_n + \Phi_b + \Phi_Z.$$

Этот поток на основании предыдущего может быть выражен так:

$$\Phi_S = b_D \cdot AS \cdot l (2\lambda_n + 2\lambda_Z + \lambda'_b).$$

Обозначив для кратности $\lambda = 2\lambda_n + 2\lambda_Z + \lambda'_b$, напишем

$$\Phi_S = b_D \cdot AS \cdot l \cdot \lambda$$

При пользовании формулой для расчета реактивного напряжения полезно заметить, что для машин малой и средней мощности ориентировочными величинами удельной магнитной проводимости паза является $\lambda = 6 - 7$; для больших машин обычно получается $\lambda = 4 - 5$.

Пример. Найдем величину удельной магнитной проводимости пучка короткозамкнутых секций в момент коммутации для электромашины со следующими данными:

$$h_n = 30 \text{ mm}; \; b_n = 10 \text{ mm}; \; r = 12 \text{ mm}; \; \delta'_k = 5 \text{ mm};$$

$$b_d = 25 \text{ mm}; \quad \frac{l_b}{l} = 2{,}0.$$

Напишем $\lambda = 2\lambda_n + 2\lambda_Z + \lambda'_b$.

Найдем

$$2\lambda_n = \lambda_{n_1} + \lambda_{n_2} = 1{,}25\frac{r}{3\,b_n} + 1{,}25\frac{4\,r}{3\,b_n} =$$

$$= 1{,}25\frac{12}{3\cdot 10}\,1{,}25\frac{4\cdot 12}{3\cdot 10} = 2{,}5;$$

$$\lambda_Z = 0{,}15\frac{b_d}{\delta'_k} - 0{,}15\frac{25}{5} - 0{,}75; \quad 2\lambda_Z = 0{,}75\cdot 2 = 1{,}5;$$

$$\lambda'_b = \frac{l_b}{l}\lambda_b = 2{,}0\cdot 0{,}6 = 1{,}2.$$

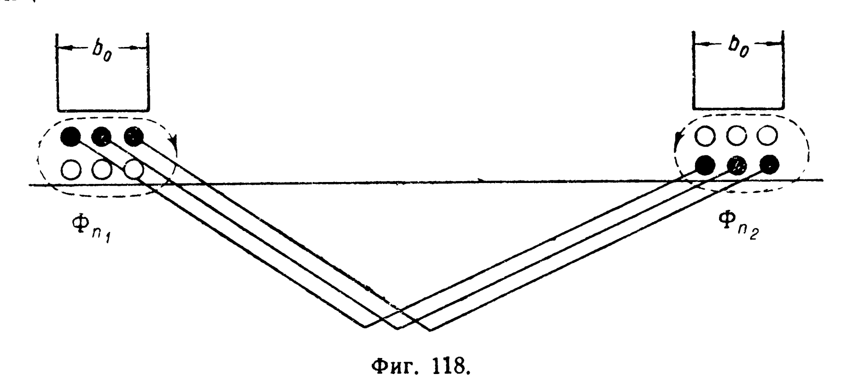
Получим окончательно

$$\lambda = 2\lambda_n + 2\lambda_Z + \lambda'_b = 2{,}5 + 1{,}5 + 1{,}2 = 5{,}2.$$

§ 50. Поток, создаваемый торцевыми частями короткозамкнутой секции. Обращаясь к фиг. 115, видим, что вокруг торцевых частей секции на протяжении $2l_b$ образуется магнитный поток Φ_b. Силовые линии потока главным образом протекают в воздухе, поэтому для обозначения этого потока принят индекс b. Величину этого потока при токе в 1 А можно найти по формуле

$$\Phi_b = \frac{1}{2} b_D \cdot AS \cdot 2 l_b \lambda_b = b_D \cdot AS \cdot l \left[\frac{l_b}{l} \lambda_b\right],$$

где λ_b — удельная магнитная проводимость для торцевых частей секции.



Фиг. 118.

В вышенаписанную формулу входит множитель $^1/_2$ потому, что торцевые части нижнего и верхнего слоя обмотки в воздухе расположены под разными углами относительно оси; вследствие этого здесь магнитодвижущие силы верхнего и нижнего слоя не суммируются, и удваивать вышеизложенное выражение для торцевого потока не следует.

Суммарный магнитный поток Φ_S, связанный с короткозамкнутыми секциями, выразится следующим образом (см. фиг. 118):

$$\Phi_S = 2(\Phi_{n_1} + \Phi_{n_2}) + \Phi_b;$$

$$\Phi_S = b_D \cdot AS \cdot l(\lambda_{n_1} + \lambda_{n_2}) + b_D \cdot AS \cdot l \left(\frac{l_b}{l} \lambda_b\right);$$

$$\Phi_S = b_D \cdot AS \cdot l \left(\lambda_{n_1} + \lambda_{n_2} + \frac{l_b}{l} \lambda_b\right);$$

$$\Phi_S = b_D \cdot AS \cdot l \cdot \lambda.$$

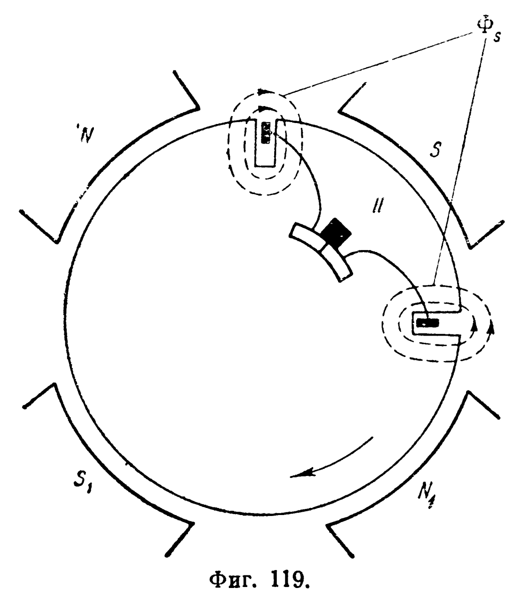
Автор настоящей книги предлагает пользоваться в случае приближенных расчетов следующей простой эмпирической формулой, позволяющей быстро найти удельную магнитную проводимость

$$\lambda = 3 + \frac{\tau}{l}.$$

Так, например, если известно для какого-либо частного случая, что $\frac{\tau}{l} = 1{,}2$, то найдем

$$\lambda = 3 + 1{,}2 = 4{,}2.$$

§ 51. Электродвижущая сила, индуктированная в секции колебаниями потока рассеяния в момент коммутации. На фиг. 119 показана секция обмотки якоря, в которой совершается процесс коммутации. При вращении якоря (по часовой стрелке, как показано на фиг. 119) рассматриваемая секция перемещается из квадранта *I* в квадрант *II*; за этот период в секции происходит изменение направления тока, текущего в ней.



Фиг. 119.

Самый процесс изменения тока совершается в тот момент, когда провода секции находятся в междуполюсном пространстве—коммутационной зоне, причем коллекторные пластины секции замкнуты в этот момент времени на короткое щеткой.

Секция, обтекаемая током, сцеплена с потоком Φ_s. До начала коммутации этот поток имеет величину $+\Phi_s$, по окончании, коммутации, когда секция переместится под полюс противоположной полярности, направление тока в этой секции будет обратное прежнему, поэтому поток по окончании коммутации будет равен $-\Phi_s$.

Таким образом за время коммутации изменение потока, сцепленного с секцией, выражается следующим образом:

$$\Delta\Phi_s = +\Phi_s - (-\Phi_s) = 2\Phi_s.$$

Это изменение потока служит причиной наведения э. д. с. в секции (фиг. 120).

Электродвижущая сила, индуктированная изменяющимся потоком Φ_s в короткозамкнутой секции (имеющей N витков), выразится

$$e = w\frac{d\Phi_s}{dt}.$$

Средняя величина индуктированной э. д. с. может быть найдена из выражения

$$e_{cp} = e_r = w\frac{\Delta\Phi_s}{\Delta t}.$$

Подставляя сюда

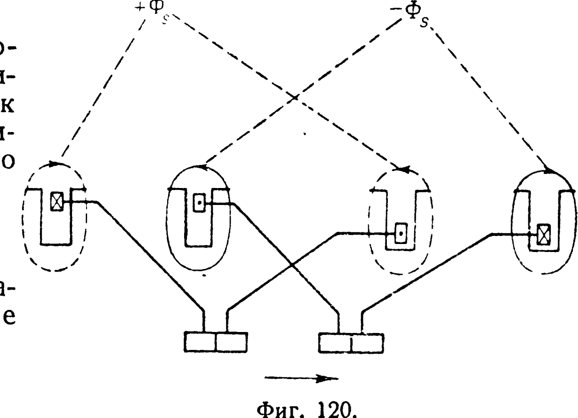
$$\Delta\Phi_s = 2\,\Phi_s,$$

$$\Delta t = T,$$

найдем

$$e_r = w\frac{2\,\Phi_s}{T}\,, \tag{51,1}$$

где T — время, в течение которого секция замыкается на короткое щеткой, или время коммутации.



Фиг. 120.

Зная окружную скорость якоря v и величину приведенной к окружности якоря ширины щетки b_D, можно написать

$$T = \frac{b_D}{v}\,.$$

Подставляя это выражение в уравнение (51,1), найдем

$$e_r = w\frac{2v\,\Phi_S}{b_D}$$

Подставляя сюда найденное выше выражение для магнитного потока Φ_S, найдем

$$e_r = w\frac{2\,v\,b_D AS\,l\left(\lambda_{n_1} + \lambda_{n_2} + \frac{l_b}{l}\,\lambda_b\right)}{b_{e_1}}\,;$$

$$e_r = 2\,w\cdot v\cdot AS\cdot l\left(\lambda_{n_1} + \lambda_{n_2} + \frac{l_b}{l}\,\lambda_b\right)10^{-8}\,.$$

Можно ввести в эту формулу среднюю величину удельной магнитной проводимости паза λ_n:

$$\lambda_n = \lambda_{n_1} - \lambda_{n_2},$$

откуда

$$\lambda_{n_1} + \lambda_{n_2} = 2\lambda_n.$$

После подстановки последнего соотношения в выражение для э. д. с. найдем

$$e_r = 2\,w\cdot v\cdot AS\cdot l\left(2\lambda_n + \frac{l_b}{l}\,\lambda_b\right)10^{-8}.$$

Пренебрегая при грубых подсчетах величиной торцевого рассеяния, т. е. полагая $\lambda_b \approx 0$, получим более простой вид для выражения

$$e_r = 4w\cdot v\cdot AS\cdot l\cdot\lambda_n\cdot 10^{-8}.$$

Обозначая в формуле

$$2\lambda_n + \frac{l_b}{l}\lambda_b = \lambda_{n_1} + \lambda_{n_2} + \frac{l_b}{l}\lambda_b = \lambda,$$

перепишем ее в более простом виде:

$$e_r = 2w \cdot v \cdot AS \cdot l \cdot \lambda \cdot 10^{-8}. \qquad (51,2)$$

Эту э. д. с. часто обозначают термином „реактивное напряжение“ (Reaktanz — Spannung по-немецки и reactive e. m. f. по-английски), чем объясняется индекс r, принятый при обозначении этой величины.

ГЛАВА ШЕСТАЯ

СПОСОБЫ УЛУЧШЕНИЯ КОММУТАЦИИ

Как было выяснено в § 36 (также фиг. 94), главной причиной искрения коллектора под щеткой является вызванный реактивным напряжением e_r добавочный ток коммутации, который влечет за собой неравномерное распределение плотности тока в контактной поверхности щетки

$$i_s = \frac{e_r}{r_x}.$$

Как показывает это уравнение, для уменьшения добавочного тока у нас имеются два средства:

1) увеличение знаменателя уравнения или
2) уменьшение числителя.

Увеличение знаменателя вышенаписанного выражения может быть достигнуто путем увеличения сопротивления короткозамкнутой секции; уменьшение числителя может быть достигнуто или путем надлежащего смещения щеток или устройства дополнительных полюсов. Рассмотрим каждый из этих способов в отдельности.

§ 52. Увеличение сопротивления короткозамкнутой секции. Для уменьшения величины добавочного тока было предложено ввести между обмоткой якоря и коллекторными пластинами добавочные сопротивления ρ.

В этом случае величина добавочного тока, протекающего по короткозамкнутой секции, выразится так:

$$i_s = \frac{e_r}{2\rho + r_x},$$

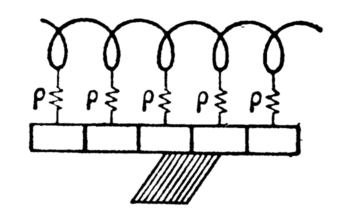
где r_x — переменное контактное сопротивление щетки.

Так как введение добавочных сопротивлений ρ усложняет и удорожает конструкцию машины и, кроме того, понижает ее

к. п. д., то этот способ улучшения коммутации в настоящее время совершенно оставлен.[1]

В тех случаях, когда коммутация протекает в особо трудных условиях (например, высоковольтные машины, машины с большой линейной нагрузкой якоря AS и т. п.), вместо введений добавочных сопротивлений в цепь якоря в настоящее время применяют щетки с большим переходным сопротивлением.

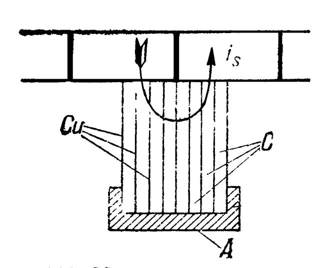
В прежнее время в машинах постоянного тока применялись медные щетки; так как контактное сопротивление таких щеток очень невелико, то даже при очень малых величинах реактивного напряжения e_r получались большие дополнительные токи i_S, вследствие чего такие машины почти всегда работали с искрением.



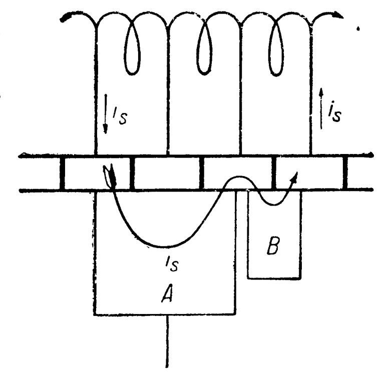
Фиг. 121. Обмотка с добавочным сопротивлением ρ.

По этой причине в настоящее время для динамомашины постоянного тока медные щетки применяются только в случае машин низкого напряжения для электролитических целей; в этих машинах, строящихся всего на несколько вольт, применяются иногда медные щетки во избежание большого падения напряжения в контакте щеток.

Слоистые медноугольные щетки. Для увеличения сопротивления пути, по которому проходит добавочный ток, были предложены так называемые медноугольные щетки, которые состоят из чередующихся медных Cu и угольных C слоев (фиг. 122); в поперечном направлении (перпендикулярном к поверхности слоев) сопротивление таких щеток получается примерно в пять раз больше, чем в продольном. Большого



Фиг. 122. Медноугольная щетка. Cu — медь, C — уголь.



Фиг. 123. Главная щетка *A* и вспомогательная щетка *B*.

влияния эти щетки на добавочный ток, однако, не оказывают, так как добавочный ток i_s при щетках этой системы находит себе путь по медным слоям к держателю щетки *A*.

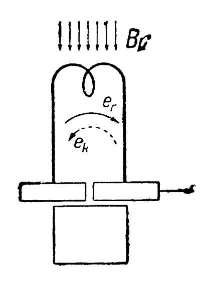
---

[1] В коллекторных двигателях переменного тока, в которых коммутация совершается при особо трудных условиях, сохранились и до сего времени кон-

§ 53. Вспомогательные щетки. Юнг (Young) и Дэнн (G. S. Dunn)[1] предлагают устанавливать рядом с главной щеткой A еще вспомогательную, изолированную от первой, B (фиг. 123). Благодаря такому расположению добавочный ток i_s принужден трижды пройти переходное сопротивление щеток, как это схематически показано на фиг. 123 стрелкой, вследствие чего его величина уменьшается и для коммутации создаются благоприятные условия.

§ 54. Смещение щеток. Реактивное напряжение e_r мы имеем возможность компенсировать другой э. д. с. e_k, которую мы выше назвали коммутирующей э. д. с.; эта э. д. с. должна действовать в той же короткозамкнутой секции, что и e_r, и, кроме того, должна быть ей по возможности равна и направлена в противоположную сторону.

Для того чтобы в короткозамкнутой секции кроме e_r еще появилась э. д. с. e_k, необходимо заставить эту секцию вращаться в некотором магнитном поле B_k, сдвигая для этой цели щетки по направлению вращения в случае работы машины генератором и смещая эти щетки против направления вращения в том случае, если машина работает как двигатель (фиг. 124).



Фиг. 124. Компенсация реактивного напряжения.

Коммутирующая э. д. с. e_k, индуктированная в короткозамкнутой секции барабанной обмотки, вследствие пересечения последней силовых линий вышеупомянутого магнитного поля, которое в дальнейшем мы будем называть коммутирующим, может быть выражена таким образом:

$$e_k = B_k \cdot 2w \cdot v \cdot l \cdot 10^{-8} \text{ вольт,}$$

где B_k — магнитная индукция коммутирующего поля. Так как для полной компенсации необходимо, чтобы $e_k = e_r$, то на основании уравнения (45,6) получаем

$$B_k \cdot 2w \cdot v \cdot l \cdot 10^{-8} = 2w \cdot v \cdot l \cdot \lambda \cdot AS \cdot 10^{-8},$$

откуда

$$B_k = \lambda \cdot AS. \tag{54,1}$$

Принимая же во внимание уравнение (52,2), получим более простое и приближенное выражение:

$$B_k \approx \lambda AS. \tag{54,2}$$

На фиг. 125 показана кривая изменения магнитной индукции B_k коммутирующего поля для того случая, когда щетки смещены под край полюса.

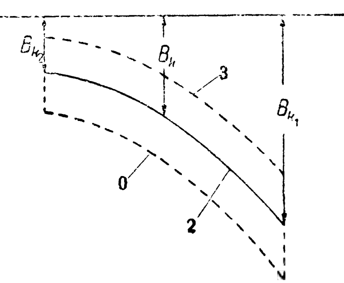
струкции якорей с добавочными сопротивлениями (см. К. И. Шенфер, Коллекторные двигатели переменного тока).

[1] См. „Electrical World", 1905, стр. 481.

Как видно из этой фигуры, магнитная индукция в коммутационной зоне в этом случае имеет разную величину; на фиг. 126 изображена в увеличенном масштабе кривая коммутационного поля, магнитная индукция которого изменяется в пределах от B_{k1} до B_{k2}. Средняя величина магнитной индукции B_k с изменением нагрузки машины благодаря действию реакции якоря меняется; на фиг. 126 пунктирная кривая *0* показывает примерную кривую коммутационного поля машины при холостом ходе, а кривые *2* и *3* дают представление о коммутирующем поле при нагрузке машины.

Описанный здесь способ компенсации реактивного напряжения обладает многими недостатками.

Во-первых, как это требует уравнение (54,1), средняя величина магнитной индукции в коммутационной зоне B_k должна с увеличением нагрузки машины возрастать; здесь же в машине



Фиг. 125. Кривая магнитной индукции B_k коммутирующего поля для случая, когда щетки смещены под край полюса.

Фиг. 126. Кривая магнитной индукции в коммутационной зоне в машине без дополнительных полюсов.

со смещенными щетками, наоборот, B_k благодаря реакции якоря, как было пояснено на фиг. 126, у м е н ь ш а е т с я.

Во-вторых, как было выяснено в предыдущих параграфах, кривая магнитной индукции B_k должна иметь более или менее симметричную форму и походить на трапецию (фиг. 110), здесь же кривая B_k наклонна к оси абсцисс.

Для того чтобы уменьшить это вредное влияние реакции якоря в машинах, не имеющих дополнительных полюсов и работающих поэтому со смещенными щетками, край полюса обыкновенно сильно насыщают в магнитном отношении. Для того чтобы сделать кривую поля в коммутационной зоне п о л о ж е и чтобы уменьшить те колебания магнитного поля, которые вызываются перемещением под краем полюса зубцов якоря, что также вредно отражается на коммутации, воздушный зазор под краем полюса делают обычно больше, чем под серединой полюса.

Верхний предел для реактивного напряжения, при котором

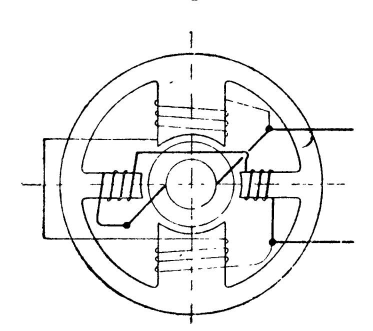
машина небольшой мощности еще может работать без смещения щеток, колеблется в среднем между 2 и 3 V.

§ 55. Дополнительные полюса. В настоящее время почти всегда машины даже небольшой мощности строятся с дополнительными полюсами. В некоторых случаях при особенно трудных условиях коммутации (в машинах с большой реакцией якоря, большой окружной скоростью и т. п.), а также в случае реверсивных машин, которые не допускают смещения щеток со среднего положения, применение дополнительных полюсов является неизбежным.

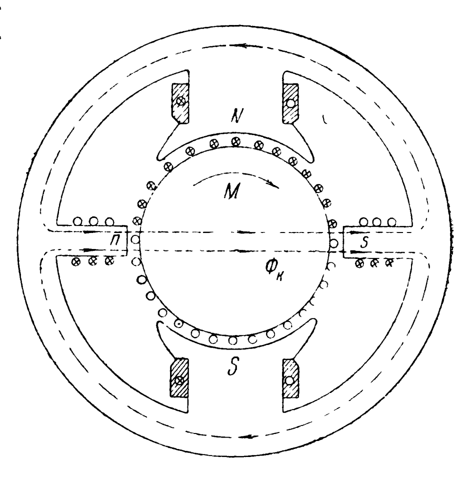
Как видно из формулы

$$B_k = \lambda \cdot AS \equiv I,$$

коммутирующее поле при изменении нагрузки должно изменяться прямо пропорционально силе якорного тока; поэтому дополнительные полюса должны возбуждаться главным током и, кроме того, должны быть слабо насыщены для того, чтобы была соблюдена прямая пропорциональность между B_k и I.



Фиг. 127. Машина с дополнительными полюсами.



Фиг. 127а.

На фиг. 127 и 127а схематически показана двухполюсная машина постоянного тока с дополнительными полюсами.

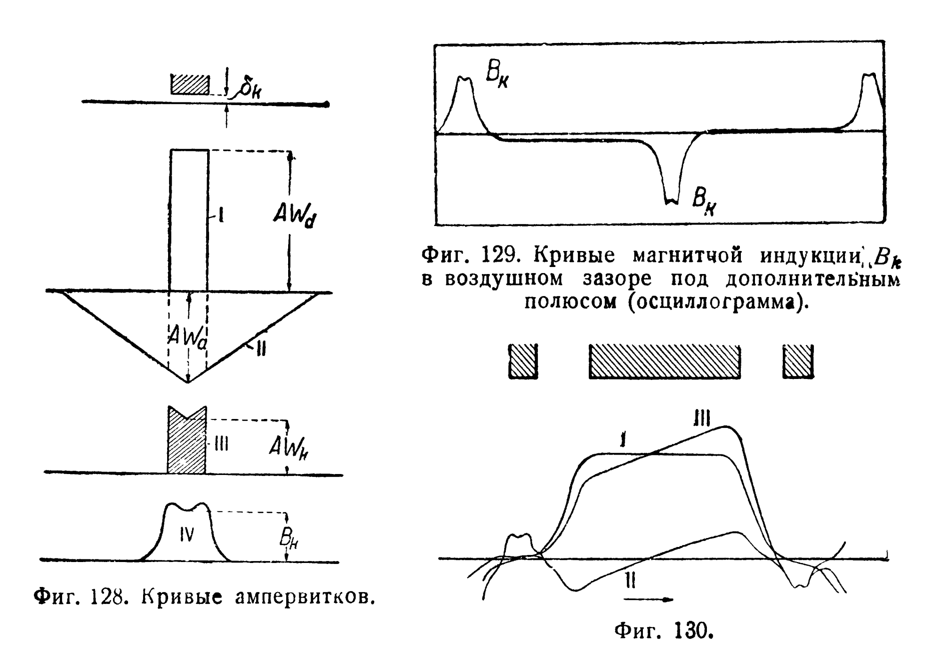
Так как одна из задач дополнительных полюсов — компенсация поля якоря в нейтральной зоне, то направление тока, текущего в обмотках дополнительных полюсов, должно быть такое, чтобы ампервитки дополнительных полюсов были направлены противоположно ампервиткам реакции якоря.

На фиг. 128 кривая *I* представляет собой кривую ампервитков дополнительного полюса; *II* — кривая ампервитков, создаваемых обмоткой якоря. Вычитая ординаты кривой *II* из кривой *I* на протяжении ширины дополнительного полюса, мы получаем результирующую *III*; под влиянием результирующих ампервитков *III* в коммутационной зоне устанавливается магнит-

ная индукция, примерная кривая которой имеет седлообразную форму (на фиг. 128 обозначена цифрой *IV*).

На фиг. 129 приведена осциллограмма кривой магнитного поля в воздушном зазоре, создаваемого дополнительными полюсами. Для снятия этой кривой в обмотку дополнительных полюсов и якорь был пущен ток от постороннего источника электрической энергии, причем якорь машины был приведен во вращение от вспомогательного двигателя. На осциллограмме фиг. 129 ясно заметна в кривых магнитной индукции B_k седлообразная вогнутость, соответствующая таковой же на фиг. 128.

На фиг. 130 показана примерная кривая магнитной индукции



Фиг. 128. Кривые ампервитков.

Фиг. 129. Кривые магнитной индукции B_k в воздушном зазоре под дополнительным полюсом (осциллограмма).

Фиг. 130.

в междужелезном пространстве для машины с дополнительными полюсами, работающей генератором.

Кривая *I* представляет собой кривую магнитной индукции при холостом ходе машины.

Если бы главные полюса не были возбуждены, а по обмотке якоря и дополнительных полюсов протекал бы ток, то мы получили бы кривую *II*.

Действительная кривая изменения магнитной индукции при нагрузке *III* может быть получена путем суммирования ординат кривых *I* и *II*.

§ 56. Приблизительный расчет дополнительных полюсов. Задача дополнительных полюсов двоякая: они, во-первых, должны компенсировать поле, создаваемое ампервитками реакции якоря AW_a в нейтральной зоне, и, во-вторых, эти полюса должны образовать в нейтральной зоне магнитную индукцию B_k.

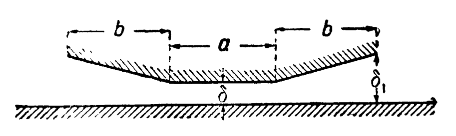
Таким образом, предполагая приближенно, что все магнитное сопротивление магнитной цепи дополнительного полюса сосредоточено в междужелезном пространстве, и пренебрегая магнитным сопротивлением всех остальных участков этой магнитной цепи, мы можем написать

$$AW_d \approx AW_a + AW_k,$$

где AW_d — число ампервитков одного добавочного полюса; $AW_a = 0{,}5\tau \cdot AS$ — число ампервитков якоря,[1] приходящееся на один полюс, и $AW_k = 0{,}8\, B_k \cdot \delta_k'$ — число ампервитков, потребное для образования в нейтральной зоне коммутирующего поля B_k; δ_k' — приведенная ширина междужелезного пространства под дополнительным полюсом.[2]

Обычно отношение $\frac{AW_d}{AW_a}$ колеблется в среднем в пределах от 1,2 до 1,3.

Ширина полюсного наконечника добавочного полюса должна соответствовать ширине коммутационного пояса; в машинах средней мощности последний бывает редко шире $^1/_{12}\ \tau$.



Фиг. 131. Форма полюсного наконечника дополнительного полюса.

Форма полюсного наконечника дополнительного полюса должна быть такой, чтобы компенсация реактивного напряжения происходила по возможности в каждый данный момент времени коммутации. Из рассмотрения кривых фиг. 105 видно, что этим условиям наилучшим образом при малом числе перекрытых пластин $n < n_t$ удовлетворяет полюсный наконечник, изображенный на фиг. 131, у которого $a = b$ и $\delta_1 = 2\delta$; для более точного определения формы наконечника следует в каждом частном случае строить кривые изменения реактивного напряжения и уже по этим кривым подбирать форму полюсного наконечника дополнительного полюса.

§ 57. **Число дополнительных полюсов**. Обычно число дополнительных полюсов в машинах постоянного тока бывает равно числу главных полюсов. Однако при барабанных обмотках с неукороченным шагом (или с малым укорочением) число добавочных полюсов можно бывает сократить в два раза.

При компенсации реактивного напряжения e_r коммутирующим e_k безразлично, в каком месте короткозамкнутой секции индуктируется э. д. с. e_r: на протяжении ли одной секционной стороны или двух.

---

[1] См. формулу (30,2).

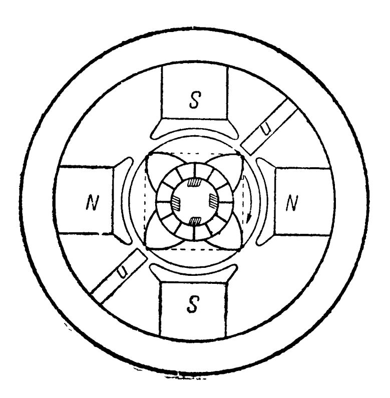
[2] В машинах, снабженных компенсирующей обмоткой, ампервитки якоря AW_a уравновешиваются ампервитками компенсирующей обмотки; поэтому число ампервитков дополнительного полюса в этом случае должно быть равно

$$AW_d = AW_k.$$

На фиг. 132 показана четырехполюсная схема машины постоянного тока с уменьшенным числом дополнительных полюсов.

Если сделать поле одного добавочного полюса такой величины, чтобы оно индуктировало э. д. с. e_k, достаточную для компенсации всей э. д. с. e_r в двух секционных сторонах, то можно обойтись без другого добавочного полюса.

При половинном числе дополнительных полюсов обыкновенно приходится брать отношение $\frac{AW_d}{AW_a}$ в пределах от 1,7 до 1,8.

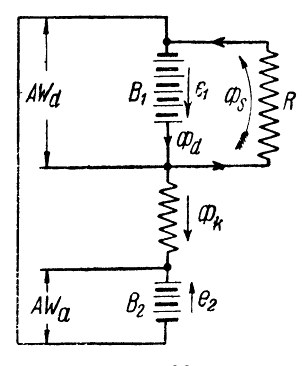


Фиг. 132. Машина с половинным числом дополнительных полюсов.

Устройство меньшего числа дополнительных полюсов представляет известные выгоды: экономия меди, лучшая вентиляция, меньшее магнитное рассеяние главных полюсов и т. п.

Машины средней и большей мощности обычно строятся с нормальным (не уменьшенным) числом дополнительных полюсов.

§ 58. Магнитное рассеяние дополнительных полюсов. Магнитный поток рассеяния Φ_s дополнительных полюсов обычно в несколько раз (4 — 5) превосходит полезный поток этих полюсов Φ_k. Причина эта лежит в большой относительно величине ампервитков якоря. Для пояснения сказанного на фиг. 133 изображена электрическая цепь, состоящая из двух батарей, э. д. с. которых e_1 и e_2 направлены друг против друга; э. д. с. e_1 на этой фигуре символизирует собой ампервитки дополнительного полюса AW_d и э. д. с. e_2 — ампервитки якоря AW_a; сопротивление R символизирует магнитное сопротивление поля утечки Φ_s.



Фиг. 133.

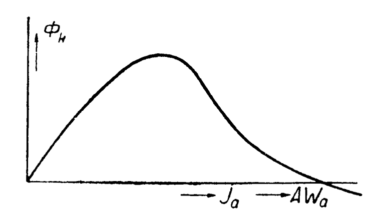
На фиг. 133 видно, что полезный поток Φ_k вызывается разностью $AW_d—AW_a$, в то время как величина рассеянного поля Φ_s зависит только от величины AW_d.

Так как обычно AW_d значительно превосходит по величине разность $AW_d—$ $—AW_a$, то отсюда ясно, что и Φ_s может достигать больших значений.

Выше сказано, что для получения коммутации без искрения необходимо, чтобы магнитная индукция в междужелезном пространстве под дополнительным полюсом B_k изменялась прямо пропорционально главному току машины I.

На практике такая пропорциональность между B_k и I может быть осуществлена только до известного предела. При больших токах I начинает возрастать магнитное насыщение допол-

нительных полюсов и магнитное рассеяние их увеличивается. Поэтому, начиная с некоторой критической нагрузки, магнитная индукция B_k при дальнейшем увеличении нагрузки начинает уменьшаться и может сделаться даже равной нулю, как это показывает фиг. 134; при больших насыщениях дополнительных полюсов последний случай может наступить уже при двойной-тройной нормальной нагрузке машины.



Фиг. 134. Кривая зависимости потока Φ_k от I_a.

В машинах с компенсирующей обмоткой насыщение дополнительных полюсов обычно получается при значительно больших токах; поэтому такие машины лучше переносят перегрузки, чем машины, не имеющие компенсирующих обмоток.

§ 59. Коммутация при толчкообразной нагрузке. При толчкообразной нагрузке магнитный поток дополнительных полюсов из-за демпферного действия токов Фуко изменяется по времени медленнее, чем ток якоря.

Вследствие этого в момент внезапных нагрузок и разгрузок машины компенсации реактивного напряжения не происходит и, несмотря на наличие дополнительных полюсов, машина искрит.

В связи с этим исследование коммутации машин постоянного тока при толчкообразной нагрузке представляет как теоретический, так и практический интерес. При толчкообразной нагрузке в короткозамкнутой секции наводится кроме реактивной э. д. с. э. д. с., индуктируемая изменяющимся потоком главных полюсов.

Особенно большое влияние э. д. с. оказывает на коммутацию в сериесных тяговых двигателях, где вместе с током якоря растет поток возбуждения.

Неполнота компенсации э. д. с. в короткозамкнутой секции при толчках тока будет тем больше, чем больше насыщена машина и чем быстрее по времени происходит процесс нарастания тока нагрузки.

Для полных исследований коммутации в машинах постоянного тока при нестационарных процессах Машинной лабораторией ВЭИ были проведены соответствующие испытания. Для опытов был взят тяговый двигатель [1] постоянного тока последовательного возбуждения с дополнительными полюсами завода „Динамо" ДБ-2 с часовой мощностью 73,1 kW. При этом были спарены две машины одинаковой часовой мощности, из которых одна работала мотором, другая нагрузочным генератором.

Во время опытов наблюдались следующие толчки тока:

---

[1] Как известно, двигатели электровоза или моторного вагона за время движения на перегоне нагружены крайне неравномерно. Толчки тока у тягового двигателя обычно появляются при пуске в ход, при отрыве дуги от воздушного провода.

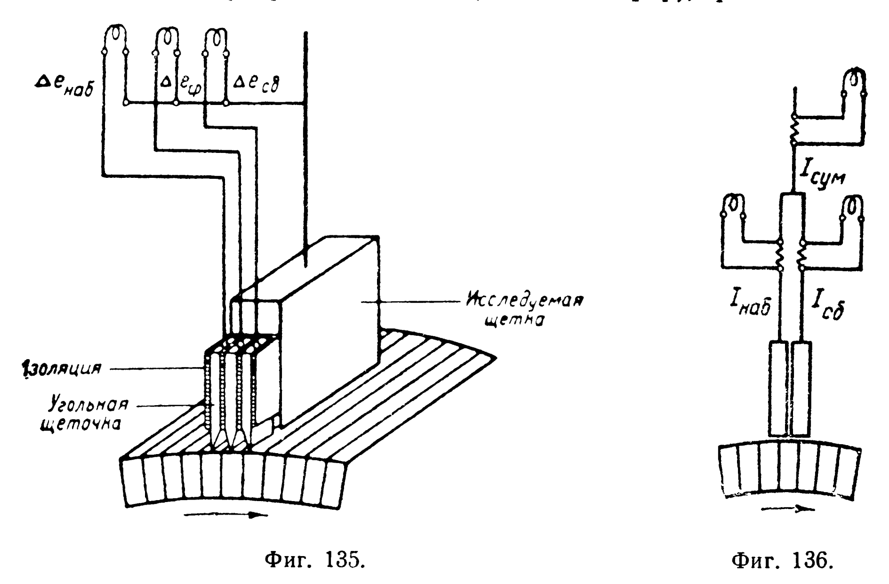
1. При $U = 250$ V толчок тока 240 A, продолжительность нарастания тока 0,1 сек.

2. При $U = 500$ V толчок тока 240 A, продолжительность нарастания тока 0,07 сек.

Определение степени удовлетворительности коммутации производилось следующими методами исследования:

1. Снятие потенциальной диаграммы под щеткой (фиг. 135) (кривые Арнольда).

2. Методом разрезной щетки (К. И. Шенфер), фиг. 136.



Фиг. 135. Фиг. 136.

3. Измерение напряжения на коллекторе под щеткой (между краями щетки, а также между краями и серединой) [1].

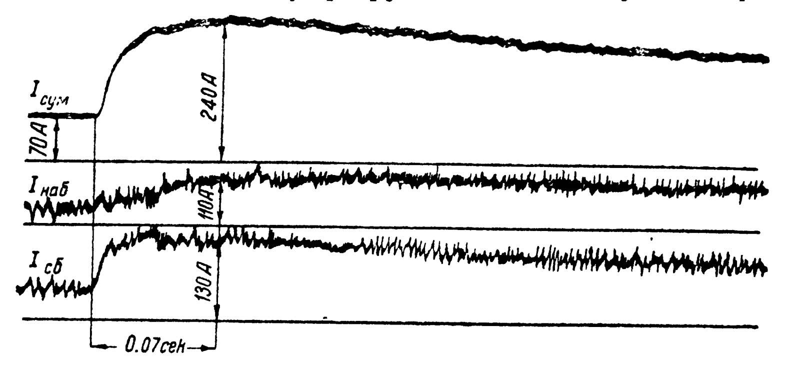
На фиг. 137 и 138 приводится часть осциллограмм, полученных при опыте.

На фиг. 137 дается картина распределения тока в разрезной щетке при толчке тока с 70 до 240 A и U генераторов 500 V, на фиг. 138 дается распределение тока в разрезной щетке при толчке тока с 30 до 240 A при U генератора 250 V. На фиг. 139 линии *3* и *4* показывают протекание кривых тока в сбегающем и набегающем крае: из сравнения этих кривых видно, что ток в набегающем крае запаздывает в своем изменении вследствие чего сбегающий край щетки оказывается перегруженным большим током.

На основании осциллограммы фиг. 137 и 138, кривых фиг. 139 можно сделать следующий вывод: при „толчке" нагрузки ток в сбегающей половине щетки нарастает значительно быстрее, чем в набегающей.

[1] По Дрейфусу опасность „кругового огня" возникает при напряжении между краями щетки, равном около 8.

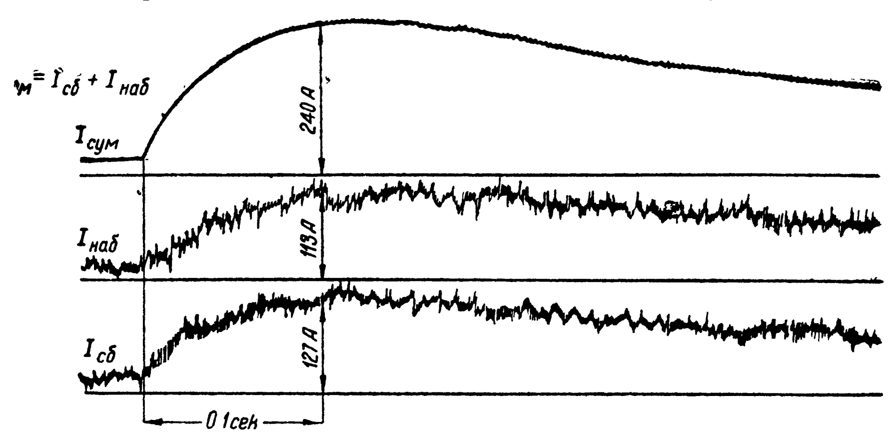
Эта разница нарастания максимальна в первый промежуток времени; по окончании процесса нарастания тока величины токов в обеих половинах щетки сближаются. Перегруженный сбегающий край щетки может поэтому подвергаться не только сгоранию, но вследствие частых резких изменений температуры также и механическому разрушению. Поэтому подбор сорта



Фиг. 137.

щеток для машин постоянного тока, работающих с толчкообразной нагрузкой (электрическая тяга, прокатные станы и т. д.), имеет большое значение.

Исследование вопроса об изменении контактного сопротивления в различных частях щетки при стационарном и нестационарном режиме методом разрезной щетки показало, что формы кривых потенциальных диаграмм лишь немногим отличаются от формы соответствующих кривых распределения тока в контакте щеток. Отсюда следует, что как метод разрезной щетки, так и метод потенциальных диаграмм под щеткой дают сравнительно правильную картину процессов, протекающих в контакте щеток.

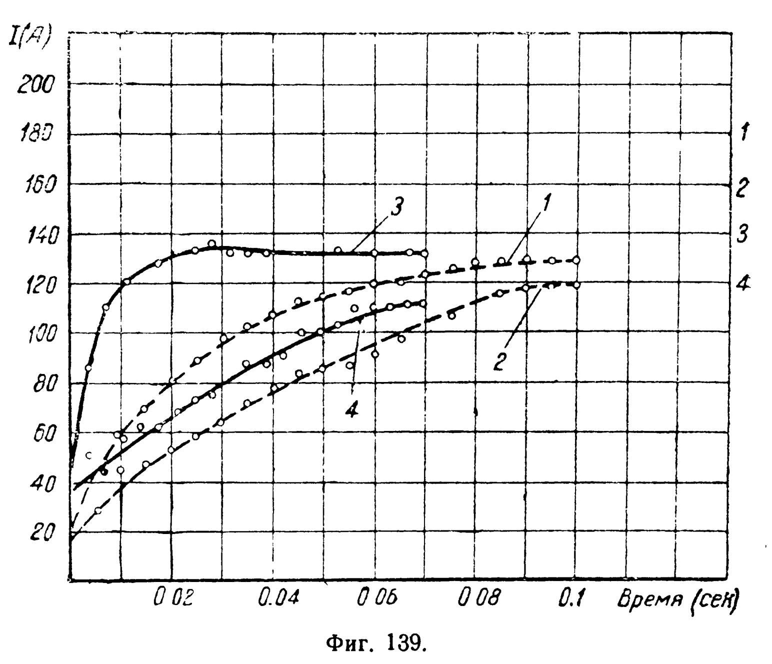


Фиг. 138.

На основании изложенного выше можно сделать следующие выводы:

1. Машины, предназначенные для толчкообразной нагрузки, целесообразно перекоммутировать при помощи соответственного усиления потока дополнительных полюсов до предела, позволяющего работать при спокойной нагрузке без искрения.

2. Для уменьшения насыщения дополнительных полюсов целесообразно их делать, по возможности, бо́льшего сечения до пределов, ограниченных конструктивными возможностями.



Фиг. 139.

3. Для крупных машин, предназначенных для привода прокатных станов, целесообразно изготовлять сердечники дополнительных полюсов из листового железа.

4. Рекомендуется допускать, где это возможно, несколько пониженную плотность тока в щетках.

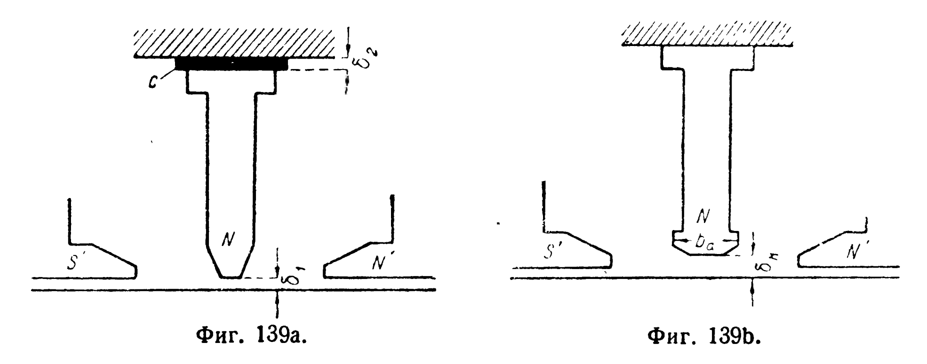
5. Эксперименты показали, что метод потенциальных диаграмм под щеткой дает возможность косвенным образом судить о плотности тока в щеточном контакте с практически достаточной достоверностью.

Нужно отметить, к сожалению, что условия удовлетворительности коммутации при толчкообразной нагрузке в электротехнических нормах СССР и также в VDE не отражены; последние только предусматривают перегрузку при стационарном режиме. Для стационарного режима наиболее тяжелые условия в отношении коммутации предъявляют нормы для тяговых двигателей постоянного тока. Согласно нормам каждый двигатель должен быть испытан в течение 60 сек. током, рав-

ным удвоенному значению часового тока; при этом двигатель не должен получить никаких механических повреждений, ни „кругового огня“, и коллектор не должен утратить способность дальнейшей работы без всякой чистки и исправлений.

§ 60. Дополнительные полюса с двойным воздушным зазором. В больших машинах часто дополнительные полюса имеют два воздушных зазора: первый зазор между якорем и наконечником дополнительного полюса δ_1, а второй — между основанием дополнительного полюса и станиной δ_2. Таким образом суммарная длина воздушного зазора здесь будет $\delta_1 + \delta_2$

На фиг. 139a изображен такой дополнительный полюс, где C — прокладка из немагнитного материала (листовой латуни или другого немагнитного материала).



Фиг. 139a. Фиг. 139b.

При такой конструкции дополнительных полюсов получается значительно меньшая величина коэфициента магнитного рассеяния этих полюсов.

При двойном зазоре уменьшается действие главных соседних полюсов на величину потока дополнительных полюсов в смысле нарушения его симметрии.

Ширина полюсного башмака дополнительного полюса. Обычно выбирают ширину полюсного башмака b_d дополнительного полюса немного меньше ширины коммутационной зоны b_k (фиг. 139b), так что

$$b_d \approx 0{,}9\ b_k.$$

Для машины с диаметральной обмоткой или с малым укорочением шага ширину коммутационной зоны можно подсчитать по следующей формуле:

$$b_k = b_D + \left(\frac{u - \frac{a}{p}}{u}\right) t_z,$$

где u — половинное число секционных сторон в пазу или число секционных сторон одного слоя;

t_z — зубцовое деление якоря.

§ 61. Допускаемая величина реактивного напряжения. По Лившицу верхний предел реактивного напряжения для машины с дополнительными полюсами не должен в среднем превосходить

$$e_r = 6\,V.$$

По Нитгаммеру e_r может иногда достигать

$$e_r = 10\,V.$$

При небольших машинах без дополнительных полюсов допускаемая величина e_r лежит обычно в пределах

$$e_r \ll 2—3\,V.$$

§ 62. Выбор величины магнитной индукции под дополнительным полюсом для машин с резко изменяющейся нагрузкой. При резких изменениях нагрузки машин постоянного тока (например, тяговых двигателей, двигателей, приводящих во вращение прокатные станы, и т. п.) вследствие демпфирующего действия токов Фуко в сердечнике дополнительных полюсов и станине и благодаря замедляющему действию самоиндукции обмоток происходит некоторое запаздывание в изменении величины потока дополнительных полюсов, что вредно сказывается на коммутации.

Кроме того, необходимо иметь в виду, что вследствие очень большой величины коэфициента магнитного рассеяния дополнительных полюсов (порядка в среднем 4—5) поток в коммутационной зоне при больших перегрузках машины обычно имеет величину, недостаточную для получения безыскровой коммутации. Поэтому в таких случаях можно рекомендовать рассчитывать дополнительные полюса машины таким образом, чтобы при нормальной нагрузке магнитное поле в коммутационной зоне было несколько больше, чем этого требуют условия коммутации. [1]

Такая машина, следовательно, при нормальной нагрузке будет характеризоваться несколько „ускоренной" коммутацией, однако эта машина в смысле безыскровой коммутации будет лучше переносить возможные перегрузки и толчки тока.

Имея в виду вышеизложенное для машин, подвергаемых резким перегрузкам, можно рекомендовать при расчете дополнительных полюсов увеличивать на 10—20% магнитную индукцию под дополнительным полюсом B_k, полученную из расчета

$$B_k = \lambda AS.$$

§ 63. Следование полярности дополнительных полюсов. Теория и опыт показывают, что для улучшения условий комму-

[1] Понятно, усиление потока в коммутационной зоне не должно быть чрезмерно большим и не должно превосходить известных границ во избежание появления искрения под щетками при нормальной работе.

тации в машине, не имеющей дополнительных полюсов и работающей двигателем, следует щетки смещать против направления вращения машины.

Если машина работает генератором, то щетки следует смещать по коллектору по направлению вращения.

Для машины с дополнительными полюсами представление о следовании полярности главных полюсов N и S и вспомогательных полюсов n и s при данном направлении вращения якоря можно получить из нижеприведенной схемы:

	Следование полярностей полюсов	Направление вращения якоря
Генератор	N-s-S-n-N-s-S-n	⟶
Двигатель	N-n-S-s-N-n-S-s	⟶

§ 64. Влияние величины реактивного напряжения. На первый взгляд может показаться, что в машинах, имеющих дополнительные полюса, можно гарантировать хорошую коммутацию при всяких даже очень высоких значениях линейной нагрузки AS, а следовательно, и при весьма высоких значениях реактивного напряжения.

Опыт, однако, показывает, что здесь нельзя переходить известных границ (в отношении AS и e_r).

Причина заключается в том, что дополнительные полюса могут компенсировать реактивное напряжение лишь по его средней величине, при этом остаются неукомпенсированными высшие гармонические в кривой реактивного напряжения (выступающие зубцы в кривых реактивного напряжения, как показано на фиг. 108).

Вредное влияние неукомпенсированных высших гармоник в кривой реактивного напряжения можно, однако, до некоторой степени уменьшить путем устройства эквипотенциальных соединений; в особо тяжелых условиях рекомендуется присоединение каждой коллекторной пластины к этим уравнительным соединениям. Еще более совершенные результаты достигаются при помощи методов, описанных ниже.

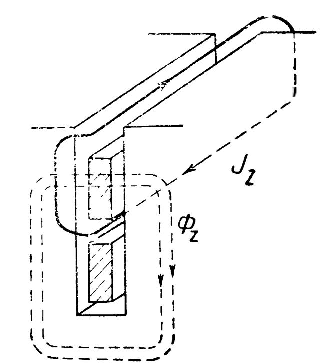
§ 65. Машины без дополнительных полюсов. Если реактивное напряжение по величине не превосходит двойного падения напряжения в щеточном контакте, т. е. не превосходит 2—3 V, то обычно при работе машины не возникает затруднений коммутации и машина часто может работать без искрения даже при отсутствии дополнительных полюсов.

Практика электромашиностроения требует, однако, постановки дополнительных полюсов и в случае относительно малых значений (меньших 2—3 V) для получения хорошей коммутации при разных режимах работы электрических машин.

При большей величине реактивного напряжения — больше 2—3 V — дополнительные полюса необходимы.

В настоящее время без дополнительных полюсов обычно строятся только очень малые машины (не выше $^1/_2$—$^3/_4$ kW).

§ 66. Пазовый демпфер. Как было сказано выше, дополнительные полюса компенсируют реактивное напряжение лишь по его средней величине, причем остаются неукомпенсированными высшие гармоники реактивных напряжений.



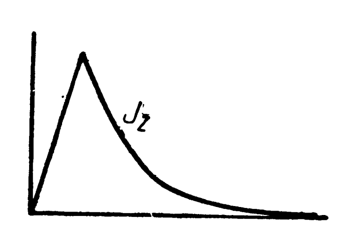
Фиг. 140. Короткозамкнутые витки, заложенные в пазы якоря.

Для уменьшения величины последних Дрейфус предлагает в пазы якоря закладывать короткозамкнутые витки, как показано на фиг. 140: здесь при изменении зубцового потока Φ_Z в момент коммутации в таком витке наводится ток I_Z, который заглушает колебания потока Φ_Z.[1]

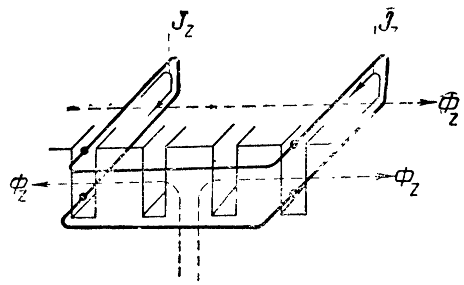
Необходимо заметить, что автор еще раньше (в 1921 г.) предложил такой же метод демпфирования зубцового потока. Отличие расположения, предложенного автором настоящей книги, от расположения Дрейфуса, заключается в том, что автором был применен вместо витка Дрейфуса сплошной медный стержень, заложенный в ряд рядом с рабочими проводами.

Согласно опытам автора и Дрейфуса пазовый демпфер в известных случаях может понизить величину той части реактивного напряжения, которая вызывается зубцовыми потоками, на 30—45% от первоначальной величины.

§ 67. Пазовый демпфер по Дрейфусу. Вышеописанный метод „гашения" пазового потока при помощи замкнутых на



Фиг. 141. Кривая тока в демпферной обмотке.



Фиг. 142. Пазовый демпфер Дрейфуса.

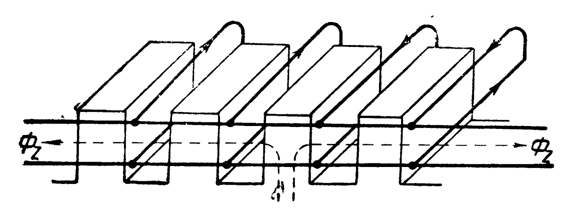
себя витков обладает тем недостатком, что влечет за собой относительно большое увеличение потерь и нагрева. По-

[1] См. „Archiv fur Elektrotechnik" № 5, 1932.

*

следнее обусловлено появлением в демпфере тока I_z (фиг. 141).

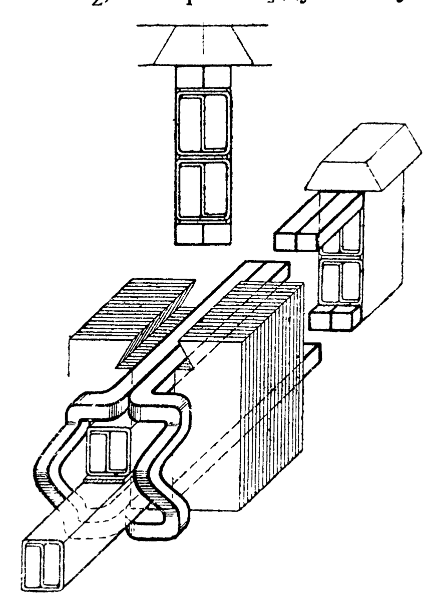
Для устранения этого недостатка Дрейфус предложил другую систему демпфера пазового потока, которая характеризуется тем, что ток I_z в таком демпфере течет только в тот момент, когда последний находится в коммутационной зоне, а во все остальное время в демпферах токов нет.



Фиг. 143. Другое исполнение демпфера Дрейфуса.

Для этой цели Дрейфус изгибает виток проволоки таким образом, как показано на фиг. 142. Из этой фигуры видно, что колебания зубцового потока Φ_z (в момент коммутации, когда демпфер находится в коммутационной зоне) будут наводить в витке токи I_z, которые будут заглушать колебания Φ_z.

Когда, однако, при вращении якоря демпфер выйдет из коммутационной зоны, поток реакции якоря займет относительно демпферного витка положение, указываемое стрелкой Φ_z; таким образом видно, что при этих условиях поток Φ_z уже не будет сцеплен с демпферным витком и не будет в нем наводить токов.



Фиг. 144. Пазовый демпфер.

На фиг. 143 представлено другое оформление вышеописанной идеи. Как видно из этой фигуры, начала и концы демпферных петель здесь коротко соединены между собой при помощи двух колец по всей окружности якоря. При такой конструкции ток, вызванный колебанием потока Φ_z, распределяется между рядом петель, соединенных параллельно.

§ 68. Другие системы возбуждения дополнительных полюсов. Для того чтобы избежать при случайных перегрузках машин постоянного тока искрения коллектора, получающегося вследствие криволинейного характера функции $B_z = f(I)$, профессор М. Уокер (Walker)[1] предложил особый способ возбуждения дополнительных полюсов, при котором магнитная индук-

[1] См. The Electrican, 1905, т. 75, стр. 872. M. Walker, A selfadjusting commutating device.

ция в воздушном зазоре под дополнительными полюсами автоматически устанавливается надлежащей величины при всяких изменениях нагрузки.

Схема соединения дополнительных полюсов по этой системе изображена на фиг. 145.[1]

Как видно из этой фигуры, каждая щетка машины состоит из двух частей *A* и *B*, разделенных друг от друга изоляцией.

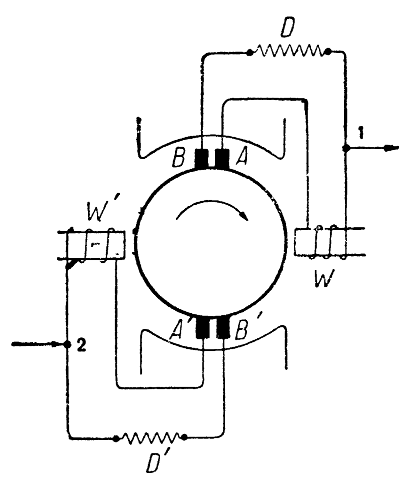
Число витков обмотки дополнительных полюсов берется вдвое больше, чем при обычной схеме, а сечение проводов этой обмотки рассчитывается на половинную силу тока якоря.

Щетка *A* соединена с сетью посредством дополнительного полюса, а щетка *B* соединена с сетью посредством реостата *D*, сопротивление которого должно быть равно сопротивлению обмотки *W* дополнительного полюса.

Таким же образом с сетью соединены щетки противоположной полярности *A'* и *B'*.

Действие этой системы заключается в следующем:

Предполагая, что число витков дополнительного полюса таково, что получается в коммутационной зоне поле надлежащей величины, и реактивное напряжение в короткозамкнутых секциях целиком укомпенсировано, мы видим, что сила тока, текущего через контактные поверхности обеих щеток *A* и *B*, имеет одинаковую величину, и ток, следовательно, в точках *1* и *2* будет разветвляться поровну.



Фиг. 145. Возбуждение дополнительных полюсов по методу Уокера.

Если почему-либо окажется, что число ампервитков дополнительного полюса чересчур велико, это вызовет ускоренную коммутацию, ток в набегающей щетке *B* увеличится, а ток в щетке *A* и обмотке *W* ослабнет; результатом этого явится автоматическое ослабление магнитного поля в коммутационной зоне.

Наоборот, если магнитное поле, создаваемое дополнительными полюсами, чересчур слабо, получится замедленная коммутация, — усилится ток в сбегающей щетке *A*, результатом чего явится усиление тока в обмотке *W* дополнительного полюса.

Опыты, произведенные профессором М. Уокером с машиной, имеющей возбуждение дополнительных полюсов описанной здесь системы, показали по его словам полную пригодность этой системы. На практике, однако, этот способ, повидимому, до сих пор широкого распространения не получил.

---

[1] На этой фигуре изображен барабанный якорь: щетки *A* и *B* и *A'* и *B'* надо понимать расположенными в нейтральной зоне

§ 69. **Величина реактивного напряжения.** Выше нами для нахождения реактивной э. д. с., индуктированной в короткозамкнутой секции обмотки якоря в момент коммутации, было получено следующее выражение:

$$e_{r\max} = C\,2w \cdot v \cdot AS \cdot \lambda \cdot l \cdot 10^{-8};$$

$$e_{k\max} = C_1\,2\,w \cdot v \cdot AS \cdot \lambda \cdot l \cdot 10^{-8}; \qquad (69,1)$$

$$e_{k\max} = \left[\frac{n_t}{n} + \frac{n - n_t}{n} k_1\right] 2\,w \cdot v \cdot AS \cdot \lambda \cdot l \cdot 10^{-8}. \qquad (69,2)$$

Здесь означают:

k_1 — коэфициент взаимоиндукции, учитывающий влияние проводов, лежащих в смежных пазах;

$e_{r\,\max}$ — реактивное напряжение (максимальное значение);

$e_{k\,\max}$ — максимальное значение напряжения, индуктированного дополнительными полюсами;

w — число витков в секции;

v — окружная скорость в m/sec;

λ — коэфициент удельной проводимости паза;

l — осевая длина железа якоря;

n — число перекрытых щеткой коллекторных делений;

n_t — число коллекторных делений, приходящихся на 1 паз.

На основании опытов автора коэфициент взаимоиндукции k_1 можно в среднем здесь принять равным

$$k_1 = 0{,}3.$$

В этом случае в формуле (69,1) коэфициент

$$C_1 = \frac{n_t}{n} + \left(\frac{n - n_t}{n}\right) \cdot 0{,}3$$

или

$$C_1 = 0{,}7\,\frac{n_t}{n} + 0{,}3. \qquad (69,3)$$

Мы можем написать

$$\frac{n_t}{n} = \frac{t_1}{b_D}, \qquad (69,4)$$

где t_1 — зубцовое деление якоря и

b_D — приведенная ширина щетки.

Подставляя (69,3) в (69,4), найдем

$$C_1 = 0{,}7\,\frac{t_1}{b_D} + 0{,}3. \qquad (69,5)$$

Подставляя (69,5) в (69,2), получим окончательно приближенное выражение

$$e_{k\,\max} = \left(0{,}7\,\frac{t_1}{b_D} + 0{,}3\right) 2\,w \cdot v \cdot AS \cdot \lambda \cdot l \cdot 10^{-8}. \qquad (69,6)$$

Из этого выражения видно, что величины реактивного напряжения $e_{r\,\max}$ и компенсирующей э. д. с. $e_{k\,\max}$ уменьшаются при возрастании ширины щетки.

Максимальная величина магнитной индукции под дополнительным полюсом на основании приведенного выше может быть найдена из выражения

$$B_k = C_1 \lambda \cdot AS; \qquad (69,7)$$

$$B_k = \left(0,7 \frac{t_1}{b_D} + 0,3\right)\lambda \cdot AS. \qquad (69,8)$$

Подставляя в формулу (69,3) разные значения $\frac{t_1}{b_D}$, найдем в виде примера:

при $b_D = t$ $C_1 = 1$;

" $b_D = 1,5t$ $C_1 = 0,77$;

" $b_D = 2t_1$ $C_1 = 0,65$.

Когда $b_D = t$, формулы (69,5) и (69,7) упрощаются, так как при этом получается $C_1 = 1$.

В этом случае получаются следующие зависимости:

$$e_{k\,\max} = 2\,w \cdot v \cdot AS \cdot \lambda \cdot l \cdot 10^{-8}, \qquad (69,9)$$

$$B_k = \lambda \cdot AS. \qquad (69,10)$$

Характерным для формул (69,9) и (69,10) является то, что в них уже не входит ширина щетки b_D.

Последнее связано с тем обстоятельством, что коэфициент C_1 при $b_D = t_1$ делается равным 1.

§ 70. **Влияние падения напряжения в щеточном контакте.** Магнитная индукция под дополнительным полюсом, подсчитанная на основании уравнений (69,8) и (69,9), дает известную гарантию получения под щеткой приблизительно равномерного распределения плотности тока.

Однако условия коммутации получаются еще лучше, когда плотность тока под сбегающим краем щетки будет приблизительно равна нулю.

При этих условиях „токи обрыва“ в последнем элементе рабочей поверхности сбегающего края щетки будут невелики или почти равны нулю и коммутация будет происходить без искрения.

На фиг. 146 изображена щетка в момент ее сбегания с коллекторной пластины *2*.

На фиг. 147 изображена эквивалентная схема замещения для фиг. 146. На фиг. 147 показана схема замещения для положения коллектора, когда щетка начинает сбегать с пластины *2* согласно фиг. 146.

На схеме фиг. 147 реостаты r_1 и r_2 изображают собой сопротивления контакта набегающего и сбегающего краев щетки.

Для того чтобы у сбегающего края щетки напряжение в этом месте контакта получить равным нулю, требуется соответствующее прямолинейной коммутации магнитное поле под дополнительным полюсом B_k увеличить на ΔB_k; таким образом при этих условиях магнитная индукция под дополнительным полюсом будет

$$B_k = B'_k + \Delta B_k.$$

Величина добавочного поля ΔB_k должна быть такой, чтобы в короткозамкнутой секции была наведена добавочная э. д. с. Δe_k, компенсирующая падение напряжения в контакте Δu, т. е. равная или немного большая чем Δu.

Рассматривая замкнутый контур на фиг. 147 в момент, близкий к сходу сбегающей пластины со щетки, можем положить $i_2 \approx 0$, вследствие чего получится

$$\Delta e_k \approx \Delta U. \qquad (70,1)$$

Величина индуктированной в короткозамкнутой секции добавочной э. д. с. выразится

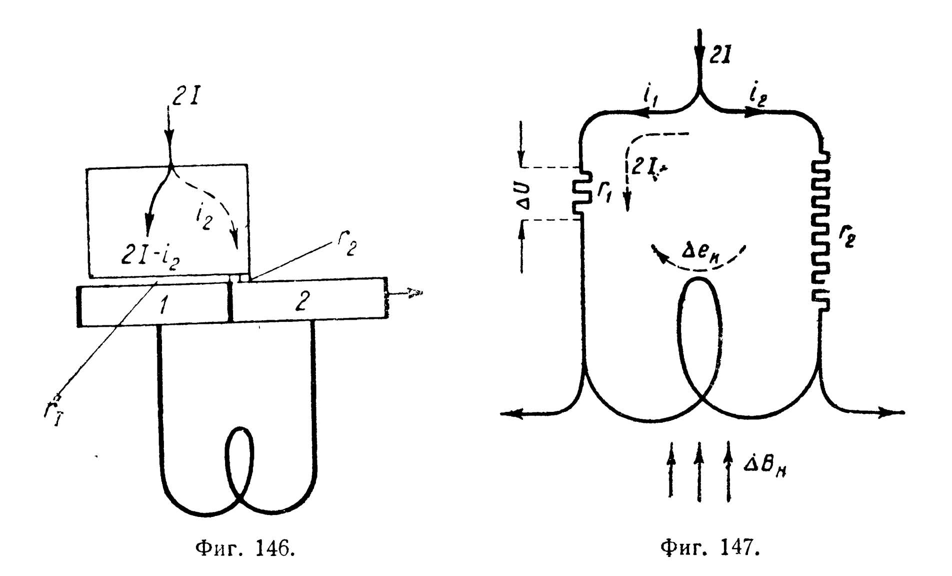
$$\Delta e_k = 2w \cdot \dot{l} \cdot v \cdot \Delta B_k 10^{-8}.$$

Подставляя Δu вместо Δe_k из (70,1), получим

$$\Delta B_k = \frac{\Delta U \cdot 10^8}{2w \cdot l \cdot v}.$$

Таким образом окончательно найдем под дополнительным полюсом величину магнитной индукции, усиленной на ΔB_k, с целью получения ускоренной коммутации, при которой плотность тока под сбегающим краем щетки будет равна нулю:

$$B_k = B'_k + \Delta B_k = \left(0{,}7 \frac{t_1}{b_D} + 0{,}3\right)\lambda \cdot AS + \frac{\Delta u \cdot 10^8}{2w \cdot v}. \qquad (70{,}2)$$



Фиг. 146. Фиг. 147.

Падение напряжения в щеточном контакте Δu, входящее в выражение (70,2), может быть принято в зависимости от сорта щеток в среднем равным

$$\Delta u = 0{,}8 - 1 \text{ V}.$$

ГЛАВА СЕДЬМАЯ

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ КОММУТАЦИИ

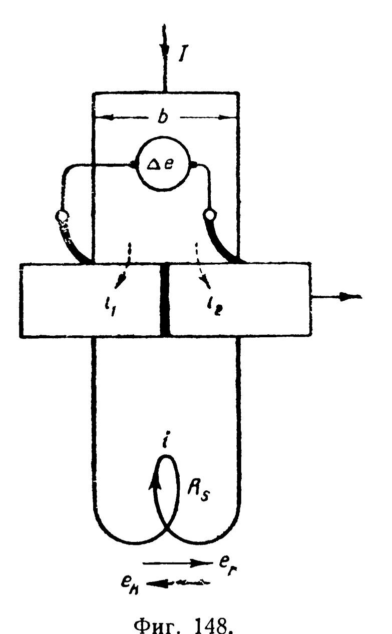
§ 71. Опытное исследование коммутации по методу потенциальной диаграммы. В момент коммутации соответственные секции обмотки якоря находятся в состоянии короткого замыкания, так как щетка в этот момент перекрывает на короткое коллекторные пластины, соединенные с этими секциями (фиг. 148). Эти короткозамкнутые секции можно рассматривать как своеобразный генератор, находящийся в состоянии перемежающегося короткого замыкания.

Обмоткой этого примитивного „генератора“ являются секции обмотки якоря, замкнутые на короткое щеткой.

Электродвижущие силы, индуктируемые в таком „генераторе“, это — реактивное напряжение e_r и э. д. с. e_k, вызванная дополнительными полюсами.

Этот „генератор“ замкнут на короткое щеткой; если бы сопротивление в контакте щетки было равно нулю, то мы бы имели на „зажимах“ этого „генератора“ напряжение, равное нулю, и напряжение между краями щетки также равным нулю:

$$\Delta e = 0.$$



Фиг. 148.

В этом случае было бы затруднительно обнаружить экспериментально э. д. с., действующие в короткозамкнутой секции; экспериментирование с такой машиной в отношении изучения коммутации было бы крайне трудным.

Однако на самом деле обычно сопротивление щеточного контакта бывает достаточно большим, так что мы можем без труда измерять величину напряжения между краями щетки (при помощи вольтметра, как показано на фиг. 148).

Проводя аналогию между короткозамкнутыми щеткой секциями — обмоткой вышеназванного примитивного „генератора“ и обычным генератором, мы приходим к заключению, что напряжение между краями щетки Δe будет здесь соответствовать напряжению на зажимах обычного генератора.

Попытаемся осветить явления, происходящие в короткозамкнутой секции, с количественной стороны.

Фиг. 149.

На фиг. 148 показана секция, короткозамкнутая щеткой, ширина которой b равна коллекторному делению.

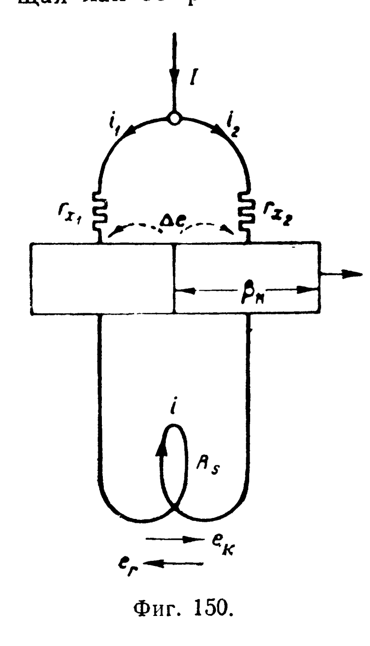
Сняв, пользуясь обычным, хорошо известным методом, потенциальную диаграмму под щеткой, получим кривую, показанную на фиг. 149.

Из этой фигуры видно, что для данного примера падение напряжения в щеточном контакте между щеткой и коллектором под сбегающим краем щетки равно e_2 и под набегающим контактом это падение напряжения равно e_1.

Взяв разность между этими величинами, получим напряжение между краями щетки $\Delta e = e_2 - e_1$. Это напряжение Δe можно

также непосредственно измерить при помощи вольтметра, как показано на фиг. 148.

На фиг. 150 показана схема замещения, наглядно учитывающая как сопротивление самой короткозамкнутой секции R_s, так и сопротивление в щеточном контакте под набегающим краем r_{x1} и под сбегающим краем r_{x2} (влиянием сопротивления самого тела щетки пренебрегаем).



Фиг. 150.

Рассматривая общий случай, предполагаем, что реактивное напряжение e_r, индуктированное в секции, только частично компенсируется напряжением e_k, индуктированным дополнительными полюсами.

Таким образом в короткозамкнутой секции действует разность э. д. с. $e_r - e_k$.

Рассматривая замкнутый контур, образованный секцией, двумя коллекторными пластинами и щеткой (согласно схеме замещения на фиг. 150), можем применить второй закон Кирхгофа и написать уравнение

$$e_r - e_k = iR_s - i_1 r_{x_1} + i_2 r_{x_2},$$

$$(e_r - e_k) - iR_s = i_1 r_{x_1} - i_2 r_{x_2} = \Delta e.$$

Полагая приближенно $iR_s = 0$, найдем

$$e_r - e_k \approx \Delta e. \qquad (71,1)$$

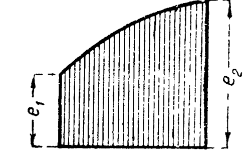
Если ширина щетки b больше одного коллекторного деления β_k, вместо уравнения (71,1) можно написать следующее:

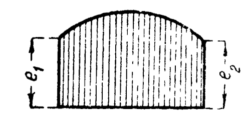
$$\beta (e_r - e_k) \approx \Delta e. \qquad (71,2)$$

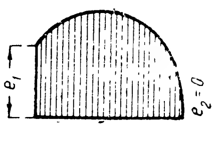
Здесь β представляет собой отношение ширины щетки b к ширине коллекторного деления β_k, т. е. $\beta = \frac{b}{\beta_k}$.

Уравнение (71,2) дает среднюю величину напряжения между краями щетки Δe.

Мгновенное значение Δe в функции времени колеблется с частотой, зависящей от ширины коллекторного деления и окружной скорости коллектора.







Фиг. 151

Рассматривая кривые потенциальных диаграмм под щеткой на фиг. 151, на основании сказанного выше можно предполагать, что верхняя диаграмма, где $e_2 > e_1$, дает указание на замедленную коммутацию, нижняя кривая — на ускоренную коммутацию, а средняя

кривая, где $e_2 = e_1$ и где, следовательно, $\Delta e = e_2 - e_1 = 0$, относится к тому случаю, когда реактивное напряжение e_r полностью компенсируется э. д. с. e_k дополнительных полюсов.

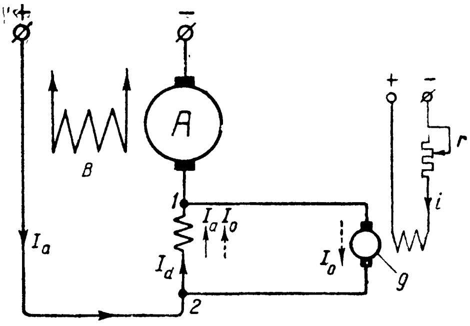
§ 72. Регулировка дополнительных полюсов по методу „безыскровой зоны“. Неудовлетворительная коммутация является часто результатом либо чересчур сильного, либо слишком слабого магнитного поля, создаваемого дополнительными полюсами.

Описываемый ниже метод[1] дает возможность обнаружить тот или иной характер коммутации машины.

Заключается этот метод в общих чертах в том, что опытным путем изменяются ампервитки дополнительного полюса до появления искрения щеток (ускоренная коммутация), а затем — в сторону ослабления (замедленная коммутация).

Производя серию таких опытов при разных нагрузочных токах, можно получить представление о качестве коммутации машины при разных нагрузках.

На фиг. 152 показана схема, применяемая обычно при таких опытах.



Фиг. 152.

На фиг. 152 означают:

A — якорь испытуемой машины;

B — ее обмотка возбуждения;

D — обмотка дополнительных полюсов;

G — обмотка вспомогательной машины, вращаемой мотором, не показанным на фигуре.

Как видно из фиг. 152, якорь вспомогательного генератора приключен к концам *1-2* обмотки дополнительных полюсов.

Изменяя при помощи реостата *r* поток возбуждения машины, а следовательно, изменяя ее э. д. с., мы можем изменять ток I_0 этой машины.

В зависимости от полярности машины *G* ее ток I_0 может менять свое направление и, следовательно, может складываться или вычитаться из тока машины I_a. Таким образом результирующий ток в обмотке дополнительных полюсов выразится

$$I_d = I_a \pm I_0.$$

Процесс опыта в общих чертах заключается в том, что ампервитки дополнительных полюсов сначала начинают постепенно увеличивать путем увеличения добавочного тока

$$I_d = I_a + I_0$$

до тех пор, пока на коллекторе не появится заметное искрение (напор оцениваем в $1^1/_2$ балла). При этом условии мы будем

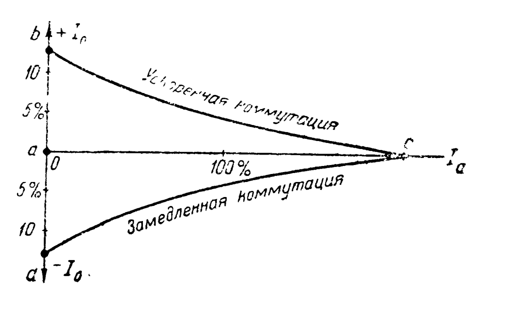
[1] См. журнал „Электричество“ № 20, 1934, статья инж. В. Т. Касьянова и статья проф. Костенко.

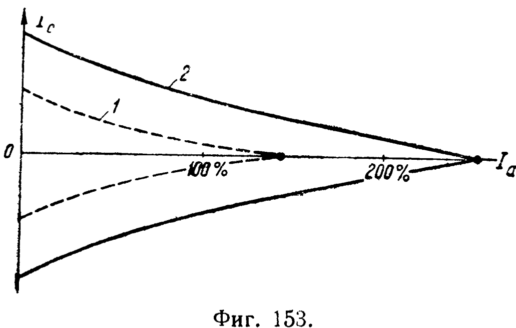
иметь в коммутационной зоне чрезмерно большую магнитную индукцию и, как результат, искрение.

Затем изменяют направление тока в обмотке возбуждения машины G, отчего также изменяется направление тока I_0 в якоре генератора G. Поэтому теперь в обмотке дополнительных полюсов D течет не сумма токов, как прежде, а разность токов $I_a - I_0$, т. е. $I_d = I_a - I_0$.

Теперь магнитное поле в коммутационной зоне по своей величине будет чрезмерно мало, и следовательно, мы получим замедленную коммутацию.

Увеличивая ток I_0, мы будем получать все меньшие и меньшие значения тока в дополнительных полюсах I_d.





Фиг. 153.

Наконец, мы начнем наблюдать искрение машины при некоторой чересчур малой величине магнитной индукции в коммутационной зоне.

В результате опытов можно построить так называемые кривые подпитки, изображенные на фиг. 153, 154.

Порядок опыта при построении этих кривых обычно бывает следующий:

Пускаем испытуемую машину вхолостую, так что ток якоря оказывается равным нулю: $I_a = 0$.

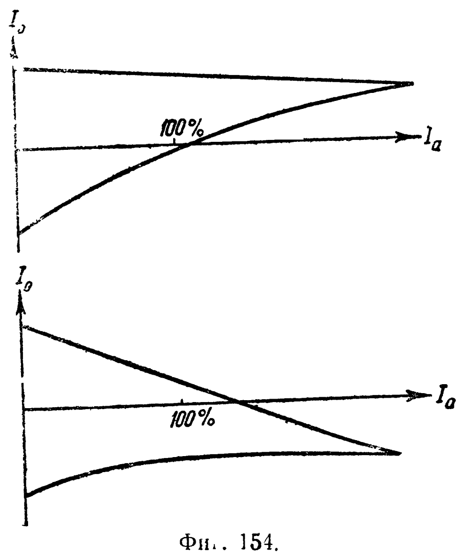
При этом начинаем увеличивать ток дополнительного возбуждения I_0, создаваемый вспомогательным генератором G, до тех пор, пока не доведем машину A до определенного состояния искрения, оцениваемого определенным баллом (например, $1^1/_2$ балла).

Таким образом на диаграмме получаем первую точку I (фиг. 153).

Затем нагружаем якорь испытуемой машины A некоторым током I_a. Пуская в обмотку D дополнительных полюсов добавочный ток I_0, мы получим в дополнительных полюсах ток $I_d = I_a + I_0$ и, следовательно, создадим условия ускоренной коммутации, при которых э. д. с. дополнительных полюсов e_k превышает реактивное напряжение e_r. Увеличивая добавочный ток I_0 (или подмагничивающий, как его называют), мы будем получать в короткозамкнутой секции все большую результирующую э. д. с. $\Delta e = e_k + e_r$.

Когда Δe достигнет некоторой критической величины, на коллекторе появится искрение. Так как искрение на коллекторе начинается всякий раз при некоторой приблизительно одной и той же критической величине Δe, то на первый взгляд может показаться, что для доведения машины до состояния искрения всегда будет требоваться одна и та же величина добавочного тока I_0 независимо от нагрузки машины.

Опыт, однако, показывает, что это не так и что при возрастании нагрузочного тока I_0 для доведения машины до состояния искрения требуется все меньшая и меньшая величина подмагничивающего тока I_0. Так, например, если при холостом ходе требовалась величина подмагничивающего тока $I_0 = 0{,}12\ I_{ном}$, т. е. 12% от номинального тока, то при перегрузке в 150% эта величина подмагничивающего тока падает примерно до 4% от номинального тока.



Фиг. 154.

Причина этого кроется в том, что э. д. с. e_k и e_r не совпадают по своей форме, так что всегда в короткозамкнутых секциях остается неукомпенсированная часть э. д. с., которая возрастает с увеличением нагрузки, благодаря чему допустимая величина тока подмагничения с возрастанием нагрузки уменьшается.

Уменьшение тока I_0 можно также объяснить частично падением сопротивления в контакте угольных щеток в связи с возрастанием плотности тока в щетках.

Описанным способом доводя машину до одной и той же степени искрения, можно построить по точкам кривую bc, которую можно назвать верхней границей искрения.

На этой верхней границе искрение щеток происходит вследствие чрезмерно большого потока дополнительных полюсов, т. е. здесь мы имеем дело с чрезмерно „ускоренной“ коммутацией.

Точно таким же способом ослабляя поток дополнительных полюсов при помощи тока подпитки I_0 (так что $I_d = I_a - I_0$), можно довести машину до искрения, которое будет обусловлено теперь „замедленной“ коммутацией. При этом по точкам может быть построена нижняя граница искрения в виде кривой dc, на которой щетки будут искрить вследствие недостаточного потока дополнительных полюсов. Площадь, ограниченная кривыми b, c, d, носит название безыскровой зоны.

Из фиг. 153 видно, что кривые верхней и нижней границ искрения пересекаются в одной точке C. Отсюда следует, что для каждой машины существует ток нагрузки, при котором ма-

шина будет искрить, каким бы током мы ни возбуждали дополнительные полюса.

Ток машины *ac* представляет собой ту предельную нагрузку машины, при которой машина еще может работать без искрения. Из сказанного ясно, что площадь, ограниченная кривыми *b*, *c* и *d*, *c*, характеризует те режимы работы, при которых машина будет работать без искрообразования.

Ясно, что быстро сходящая узкая зона безыскровой коммутации указывает на неустойчивую, чувствительную ко всяким изменениям режима работы коммутацию (кривая *1*, фиг. 153). Хорошие машины должны иметь широкую и длинную зону коммутации. Такая кривая (см. кривую *2*, фиг. 153) является показателем устойчивой и надежной коммутации. Опыт показывает, что характер протекания кривых безыскровой зоны коммутации в сильной степени зависит от сорта и доброкачественности щеток. Предел зоны безыскровой коммутации, т. е. площадь кривой *bcdc*, возрастает при щетках с относительно большим переходным сопротивлением.

Безыскровая зона тем уже и короче, чем выше скорость на коллекторе, чем больше температура щеток и коллектора.

По характеру протекания кривых зоны коммутации можно сделать заключение относительно правильного выбора числа витков дополнительных полюсов.

Так, например, если на основании опыта будет построена кривая зоны безыскровой коммутации тока фиг. 154 (нижний чертеж), это будет служить показателем того, что поток дополнительных полюсов чересчур мал, и наоборот, при чересчур сильных дополнительных полюсах мы получим кривые тока фиг. 154 (верхний чертеж).

§ 73. Коллекторная потенциальная кривая. Эта кривая выясняет нам, по какому закону происходит распределение потенциалов по окружности коллектора от одной щетки к другой. Для опытного получения этой кривой между двумя главными щетками машины b_1 и b_2 на коллекторе располагают еще вспомогательную узкую щетку b_3, как показано на фиг. 114; соединяя эту щетку с одной из главных щеток, например, b_1, через вольтметр *V* и перемещая щетку b_3 вправо по коллектору, мы наблюдаем различные показания вольтметра; нанося последние в прямоугольной системе координат, мы получаем искомую потенциальную кривую (на фиг. 114 внизу).

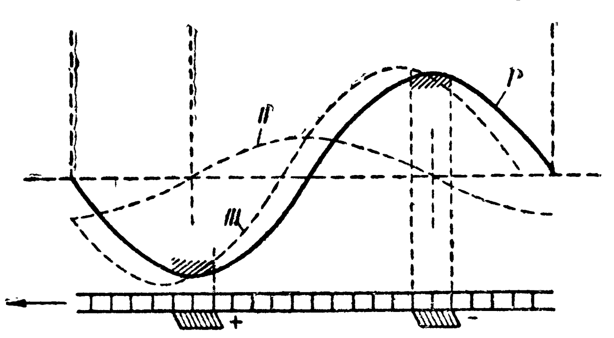
Если разноименные щетки находятся в положении b_1 и b_2, как показано на этой фигуре, то разность потенциалов между этими щетками, измеряемая как расстояние по вертикали между точками b_1 и b_2 потенциальной кривой, будет равна полному напряжению машины *U*; если щетки сдвинуты с нейтральной зоны и находятся в положении b_1' и b_2', то разность потенциалов между ними будет уже меньше, чем при их нормальном положении, а именно U'; если обе щетки сдвинуты под середину полюса и находятся в положении b_1'' и b_2'', то разность потенциалов между ними равна нулю.

При смещении щеток относительно нейтрали разность потенциалов между внешними краями щетки возрастает; максимальной величины эта разность достигает, когда щетка располагается примерно под серединой полюса (Δe на фиг. 114).[1]

Для обмотки, равномерно распределенной по окружности якоря, потенциальная коллекторная кривая представляет собой интегральную кривую кривой магнитного поля B; таким образом, например, разность потенциалов между какими-нибудь щетками b_1 и b_2 на коллекторе, равная U, пропорциональна заштрихованной площади части кривой B с основанием b_1 и b_3, как это показано на фиг. 114.

Последнее следует из того, что разность потенциалов между какими-нибудь двумя точками на коллекторе b_1 и b_3 равна сумме э. д. с., индуктированных в секциях якоря, заключающихся между этими точками, величины же этих э. д. с. пропорциональны ординатам кривой B, взятым в соответствующих точках окружности якоря.

Можно доказать, что форма потенциальной кривой будет синусоидальной при условии, что кривая распределения магнитной индукции B_l в воздушном зазоре есть тоже синусоида.



Фиг. 155. Потенциальная диаграмма при холостом ходе *I* и потенциальная диаграмма при нагрузке *III*.

Хотя в современных машинах постоянного тока последняя кривая и не бывает синусоидой, а ближе походит на трапецию со скругленными краями, тем не менее получающаяся при этом потенциальная коллекторная диаграмма получает форму, довольно близко напоминающую синусоиду.

Как показывает опыт, потенциальная диаграмма несколько изменяется по форме и немного перемещается по коллектору при изменении нагрузки машины.

Причина этого лежит в реакции якоря.

На фиг. 155 *I* изображает потенциальную кривую при холостом ходе и *III* — ту же кривую для нагруженной машины.

Из этой фигуры видно, что кривая *III* смещена на некоторое число коллекторных пластин относительно кривой *I*.

Кривая *II* на фиг. 155 изображает потенциальную кривую, которая бы у нас получилась, если бы полюса главных магнитов не были возбуждены, а по обмотке якоря протекал бы ток,

[1] Это справедливо для случая ненагруженной машины; при нагрузке потенциальная кривая несколько деформируется, и та точка коллектора, где получается максимальная разность потенциалов между смежными пластинами, смещается относительно середины полюса.

другими словами, кривая *II* есть потенциальная диаграмма, вызванная полем реакции якоря.

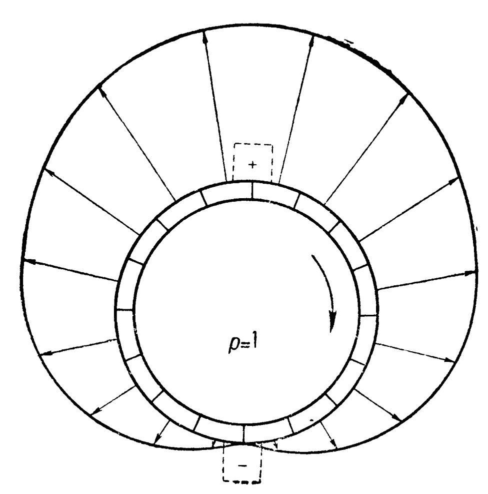
Кривая *III* получена на фиг. 155 путем сложения кривых *I* и *II*.

При работе машины генератором кривая *III* относительно *I* смещается по направлению вращения якоря, а для двигателя — против вращения.

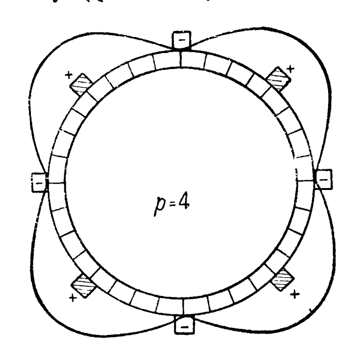
§ 74. Другой вид потенциальной диаграммы. Выше было выяснено, что если принять условно потенциал отрицательной щетки за нуль и отложить в радиальных направлениях, т. е. нормально к цилиндрической поверхности коллектора, значения соответственных напряжений между отрицательной щеткой и данной точкой коллектора и соединить между собой точки в виде кривой, то получится диаграмма, показанная на фиг. 156.

Эта так называемая „потенциальная“ диаграмма дает возможность нахождения напряжения между любыми точками окружности коллектора.

Построенная в прямоугольной системе координат эта потенциальная диаграмма напоминает синусоиду (фиг. 155).



Фиг. 156. Потенциальная диаграмма на цилиндрической поверхности коллектора.



Фиг. 157. Кривая распределения потенциала по коллектору для четырехполюсной машины.

Если построить потенциальную диаграмму на цилиндрической поверхности коллектора, т. е. откладывая значения напряжений в направлении нормалей к каждой точке цилиндра коллектора, то получится диаграмма фиг. 156.

Положение потенциальной диаграммы в пространстве строго фиксировано положением щеток. Эта диаграмма сохраняет свое неподвижное в пространстве положение независимо от скорости вращения якоря.

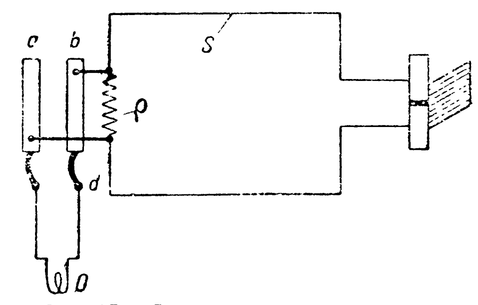
На фиг. 157 показана примерная кривая распределения потенциала по коллектору для четырехполюсной машины.

Показанный на фиг. 156 симметричный вид потенциальная диаграмма имеет только при холостом ходе машины.

При нагрузке благодаря действию ампервитков реакции якоря

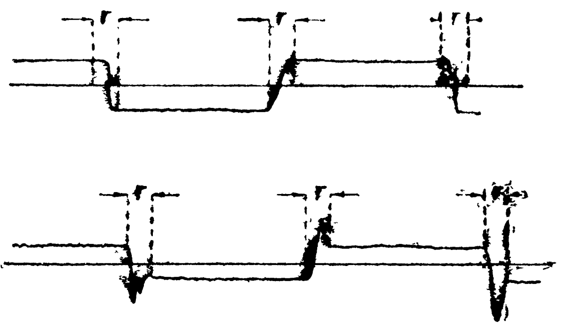
эти потенциальные диаграммы несколько искажаются, теряя свой симметричный вид.

§ 75. Опыты Арнольда. При теоретическом исследовании коммутации чрезвычайно важно знать форму кривой тока в короткозамкнутой секции.



Фиг. 158. Схема опыта снятия кривой тока в секции.

Для получения этой кривой Арнольд[1] разрезает одну из секций обмотки якоря испытуемой машины и включает в нее небольшое сопротивление ρ (фиг. 158); концы сопротивления ρ посредством контактных колец a и b и щеток c и d были соединены со шлейфой осциллографа O. При таком соединении можно было записывать при помощи осциллографа кривую разности потенциалов между контактными кольцами a и b, или что то же, кривую тока, текущего в секции S. На фиг. 159 приведены в виде примера две осциллограммы. На этих кривых фиг. 159 отмечено время, в течение которого секция испытуемой машины замыкается на короткое щеткой, другими словами, — время коммутации T. Зубцы, видные на нижней осциллограмме фиг. 159, указывают на резко неравномерное распределение плотности тока в щетке, что вызывает искрение.


Фиг. 159. Кривые тока в секции.

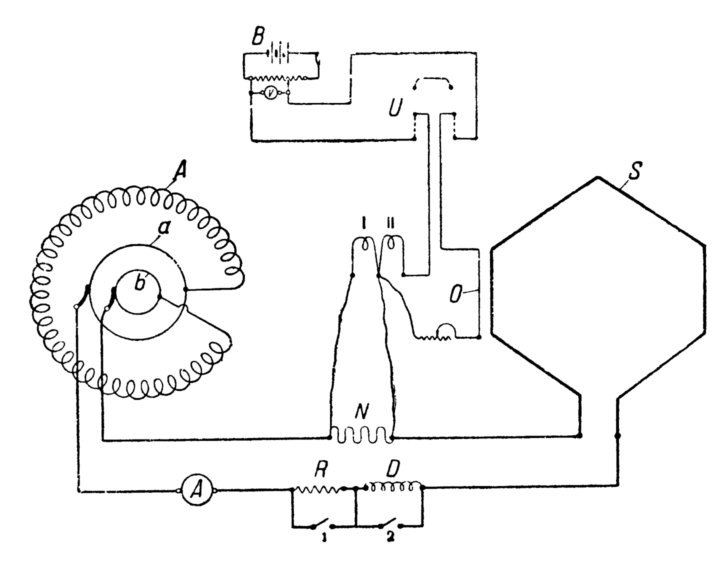
§ 76. Метод автора опытного нахождения кривой реактивного напряжения. Другой, разработанный автором, метод нахождения кривой реактивного напряжения заключается в следующем:[2]

Обмотка якоря испытуемой машины постоянного тока была разрезана в одном месте, и образовавшиеся таким образом концы обмотки якоря были присоединены к двум контактным кольцам a и b, как показано на фиг. 160; ток от этих контактных колец при помощи щеток и соединительных проводов был подведен к неподвижной секции S, заложенной в каналы необмотанного якоря. Заложенный в тот же канал якоря, что и секция S, измерительный провод O, соединенный со шлейфой II

[1] См. Arbeiten aus dem Elektrotechnischen Institut, herausgegeben von Prof. E. Arnold, 1909.

[2] См. статьи автора в журналах „Elektrotechnische Zeitschrift“ № 16, 1923. „Journal of the American Institute of Electrical Engineers“ № 11, 1922.

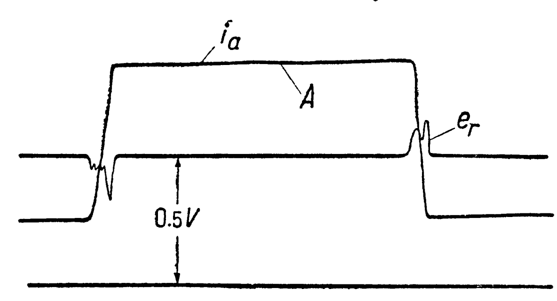
осциллографа, давал возможность наблюдать кривую э. д. с., индуктированной в этом проводе изменением тока в секции *S*, т. е. давал возможность непосредственно наблюдать кривую реактивного напряжения. Шунт *N* и шлейфа осциллографа *I* служили для записи кривой тока, протекающего по секции *S*.



Фиг. 160. Метод автора наблюдения кривой реактивного напряжения.

Переключатель *U* и батарея *B* служили для градуировки шлейфы *II*.

Достоинство расположения опыта, показанного на фиг. 160, заключается в том, что мы при изучении коммутации имеем дело с неподвижной и доступной секцией обмотки якоря машины постоянного тока, в которой, однако, все явления происходят так, как если бы секция *S* составляла часть обмотки вращающегося якоря и перемещалась в пространстве вместе с последним.



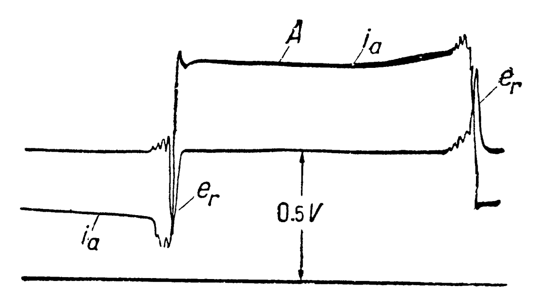
Фиг. 161. Кривая реактивного напряжения e_r и тока в секции i_a; $i_a = 15$ A; $n = 300$; дополнительные полюса возбуждены.

Реостат *R* и дроссельная катушка *D* могли быть по желанию включаемы в цепь секции *S* путем размыкания соответственных рубильников *1* и *2* и служили для выяснения влияния на характер коммутации величины сопротивления и самоиндукции в короткозамкнутой секции.

Кривые реактивного напряжения. На фиг. 161—162 показаны осциллограммы реактивного напряжения и силы тока в испытуемой секции, полученные автором при различных условиях коммутации вышеописанной машины фирмы Ламайер.

Для изменения силы тока и времени коммутации машины постоянного тока (якорь, который на схеме фиг. 160 обозначен буквой A) эта машина была пущена в ход мотором, причем изменение числа оборотов (и, следовательно, времени коммутации) достигалось изменением тока возбуждения машины, а изменение силы тока в испытуемой секции S — путем изменения нагрузки мотора.[1]

При этих опытах в канале неподвижного якоря были заложены две секции для того, чтобы заполнить обмоткой весь канал доверху, измерительный же провод O (фиг. 160) был помещен между двумя слоями обмотки на половинной примерно высоте канала от основания.



Фиг. 162. Кривая реактивного напряжения e_r и тока в секции i_a; $i_a = 15$ A; $n = 300$; дополнительные полюса не возбуждены.

На фиг. 161 показана кривая тока в секции S и кривая реактивного напряжения e_r при числе оборотов двигателя в минуту $n = 300$ и силе тока в секции $i_a = 15$ A, причем дополнительные полюса были возбуждены.

На фиг. 162 показаны такие же кривые, снятые при том же токе $i_a = 15$ A и при том же $n = 300$, но при выключенных дополнительных полюсах; из сравнения фиг. 161 и 162 видно, что при выключении дополнительных полюсов форма кривой реактивного напряжения резко меняется и превращается из седлообразной в заостренную, причем максимальная величина реактивного напряжения изменяется с 0,16 на 0,41 V, т. е. возрастает в 2,56 раз.

§ 77. Контактное сопротивление щеток. Как было выяснено в главе пятой, сопротивление короткозамкнутой секции складывается из сопротивления самой секции и затем из контактного сопротивления щеток.

Так как от величины последнего в сильной степени зависит характер коммутации в машине, рассмотрим вопрос, от каких обстоятельств зависит контактное сопротивление щеток.

Как показали исследования Э. Арнольда и Кана, контактное сопротивление щеток зависит от целого ряда факторов: материала щетки, плотности тока, направления тока, температуры щетки, нажимного давления и скорости на окружности.

Кроме перечисленного имеют еще значение сотрясения щеткодержателя и машины.

---

[1] Размеры неподвижного (необмотанного) якоря были следующие: диаметр — 250 mm, длина — 170 mm, число каналов — 40; размеры канала 10×20; испытуемая секция S состояла из трех последовательно соединенных витков, диаметр провода — 2,5 mm.

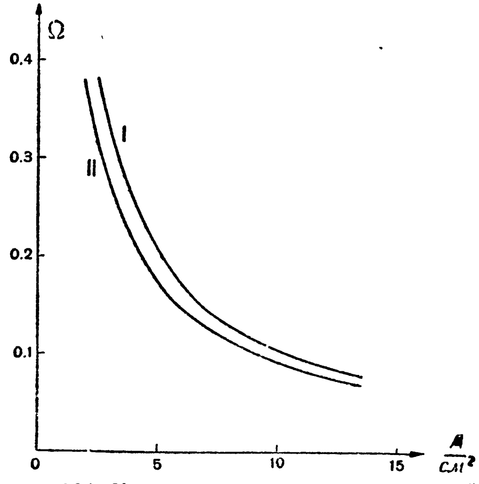
На фиг. 163 показаны кривые, полученные Арнольдом для угольных щеток средней твердости; опыты производились на контактиом кольце, которое могло быть приводимо во вращение от электродвигателя с любой, необходимой для опыта, скоростью; при этих опытах наблюдалось падение напряжения между кольцом и щеткой ΔU при разных условиях опыта. Зная величину ΔU и силу тока, притекающего к щетке, можно определить на основании этих данных величину контактного сопротивления щетки.

Фиг. 163. Кривые зависимости падения напряжения в контакте щетки ΔU в функции плотности тока.

На фиг. 164 показаны опытные кривые, полученные Каном. На этой фигуре по оси ординат отложены величины удельных сопротивлений R контакта щетки (в омах на 1 cm), а по оси абсцисс — плотности тока (в амперах на 1 cm²). Как видно из фиг. 164, переходное сопротивление R с увеличением плотности тока убывает в значительной степени.

Опыты Арнольда и Кана указали еще на одно любопытное свойство угольных щеток; оказалось, что удельное сопротивление щеток в сильной степени зависит от направления тока: при направлении тока от контактного кольца к щетке контактное сопротивление получается больше, чем при обратном направлении тока; на фиг. 164 кривая *1* получена при направелнии тока, текущего от кольца к щегке, а кривая *2* — при обратном направлении тока.

Таким образом оказывается, что все отрицательные щетки в машине, работающей генератором, имеют меньшее контактное сопротивление и, следовательно, в отношении коммутации находятся в худших условиях, чем щетки положительные; этим объясняется наблюдаемое часто на практике явление, при котором при перегрузках машин прежде всего начинают искрить щетки одной полярности, а именно — отрицательной.



Фиг. 164. Кривые удельных сопротивлений в контакте щетки в функции плотности тока.

Причины, вследствие которых играет роль полярность щеток и оказывает влияние на величину контактного сопротивления, до сих пор установить трудно за недостаточностью исследования этого вопроса.

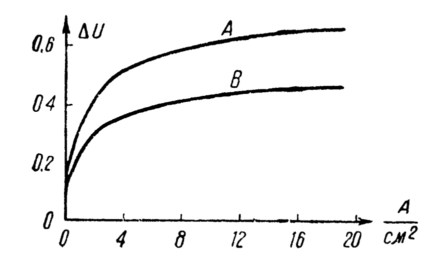
Очень возможно, что известную роль здесь играют электронные процессы в контакте щеток или электрохимические процессы, в которых щетки и коллектор играют роль катода и анода, а влажность воздуха действует как электролит.[1]

На фиг. 165 показаны кривые ΔU, снятые при окружной скорости кольца $v = 5{,}5$ m/sec, для твердых угольных щеток A и для мягких B; из этой фигуры видно, что кривая для твердых щеток значительно выше, чем для щеток мягких.

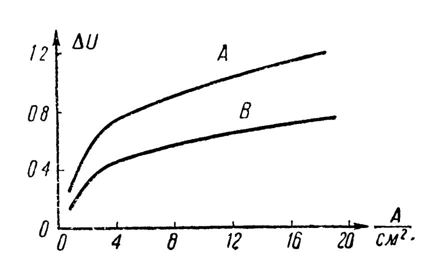
[1] Литература: 1) M. Kahn, „Der Übergangswiderstand von Kohlenbürsten", Sammlungen elektrotechnsicher Vorträge, Stuttgart 1902, F. Enke.

На фиг. 166 показаны те же кривые, полученные при работе тех же щеток, но не на кольце, а **на коллекторе** при окружной скорости $v = 12$ m/sec. Сравнивая фиг. 165 и 166 между собой, мы видим, что во втором случае кривые ΔU протекают значительно выше, чем в первом, что объясняется сотрясениями, которым подвергаются щетки на коллекторе.

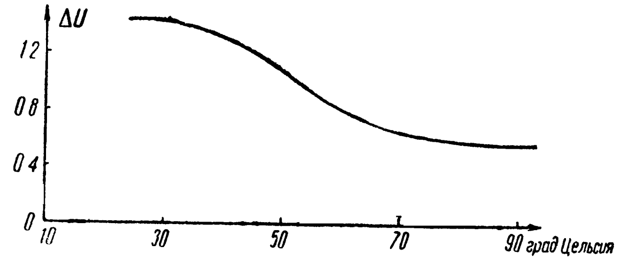
Одна из причин уменьшения контактного сопротивления щеток с увеличением плотности тока заключается, по всей вероятности, в нагреве контакта щеток. Частицы угля контактной поверхности щетки при высоких температурах размягчаются, щетка начинает плотнее прилегать к поверхности коллектора и сопротивление контакта падает. Арнольд производил опыты с контактным кольцом, которое он нагревал электрически при помощи реостата; наблюдая изменение падения напряжения в контакте ΔU при меняющейся температуре кольца



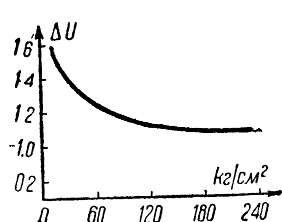
Фиг. 165. Кривые падения напряжения в контакте при работе щеток на контактном кольце.



Фиг. 166. Кривые падения напряжения в контакте при работе щеток на коллекторе.



Фиг. 167. Изменения падения напряжения ΔU в контакте угольных щеток в функции температуры.



Фиг. 168. Кривая зависимости между ΔU и нажимным давлением на щетку.

и постоянном токе в щетке, он получил ряд кривых, одна из которых приведена на фиг. 167; из этой фигуры видно, что при увеличении температуры падение напряжения ΔU, а следовательно, и контактное сопротивление щетки уменьшаются.

На фиг. 168 показана кривая зависимости между ΔU и нажимным давлением на щетку; из этой фигуры видно, что с увеличением нажимного давления при прочих равных условиях переходное напряжение ΔU (а следовательно, и контактное сопротивление) уменьшается.

§ 78. Политура на коллекторе. После более или менее длительной работы щеток на коллекторе или контактном кольце на последнем образуется слой окисла, увеличивающего переходное сопротивление (повидимому, причиной

---

2) K. Czeja, „Die experimentelle Untersuchung der Kommutierungsvorgänge in Gleichstrommaschinen", Stuttgart, 1903, F. Enke. 3) F. Hayashi, Archiv für Elektrotechnik, т. 2, стр. 70. 4) R. Czepek, Archiv für Elektrotechnik, т. 5, стр. 61.

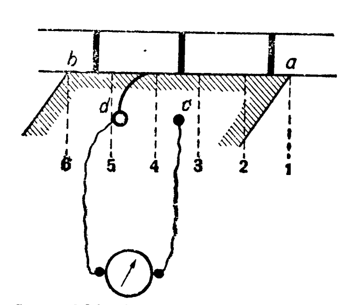
появления такого слоя являются электролитические процессы). При направлении тока от металла к углю поверхность скольжения кольца принимает темнобурую окраску, а при обратном направлении тока светлобурую. Этот слой тока носит иногда название п о л и т у р ы.

Увеличивая сопротивление щеточного контакта, политура улучшает условия коммутации. Счищая ножом слой политуры на вращающемся коллекторе работающей машины, часто можно наблюдать в первый момент времени ухудшение коммутации, пока на коллекторе не образуется слой окисла политуры.

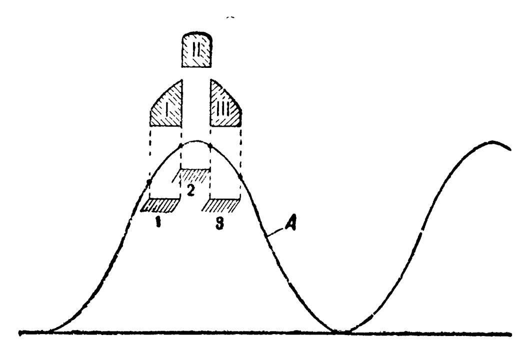
Политура улучшает коммутацию и предохраняет поверхность коллектора от дальнейшего окисления, являясь с этой точки зрения полезным явлением.

§ 79. Часть потенциальной кривой под щетками (щеточная диаграмма коммутации). Опыт показывает, что все точки тела щетки, работающей на коллекторе, имеют почти один и тот же потенциал; даже при очень больших добавочных токах, текущих в короткозамкнутых секциях и замыкающихся поперек щетки, разность потенциалов между краями щетки *a* и *b* (фиг. 169) достигает всего нескольких сотых долей вольта.

Измеряя, однако, разность потенциалов между какой-нибудь точкой щетки *a* и точками *1-2-3*,..., *6* на к о л л е к т о р е при помощи вольтметра и подвижной вспомогательной узкой щетки *d*, как это показано на фиг. 169, мы получим довольно значительные разности потенциалов, колеблющиеся между 0—1—2—3 V.



Фиг. 169. Схема опыта при снятии щеточной диаграммы.



Фиг. 170. Щеточные диаграммы *I-II-III* при разном расположении щеток.

Перемещая щетку *d* (фиг. 169) по коллектору и записывая показания вольтметра, получим так называемую диаграмму коммутации.

Если испытуемая машина работает генератором и диаграмма снимается под положительной щеткой, то при этом получится кривая, сходная с одной из кривых *I*, *II* или *III*, показанных на фиг. 170, в зависимости от того, в какую сторону перемещены рабочие щетки на коллекторе.

На фиг. 170 показана потенциальная диаграмма *A*; если положительная щетка машины, работающей генератором, находится в строго нейтральной зоне и занимает положение, отмеченное на фиг. 170 цифрой *2*, то диаграмма коммутации *II*, соответствующая этому положению щетки, будет иметь верхнее очертание, приблизительно совпадающее с очертанием потенциальной диаграммы в этом месте. [1]

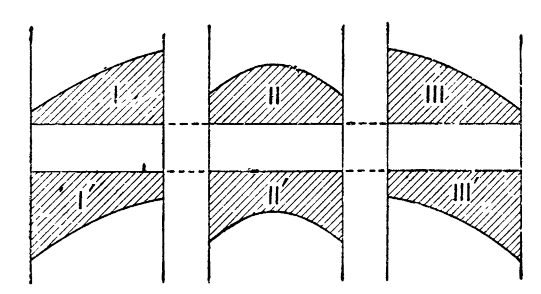
Сместив щетку по направлению вращения генератора в положение *3*, мы получим диаграмму коммутации *III*; исследуя эту кривую, мы видим, что под н а б е г а ю щ и м к р а е м при этом получается разность потенциалов больше, чем под сбегающим,— в этом случае, как показывает опыт, получается у с к о р е н н а я к о м м у т а ц и я. Смещая щетки с нейтральной зоны против напра-

[1] На самом деле, как показали опыты Арнольда, верхние очертания кривых *I*, *II* и *III* (фиг. 170) будут — отличаться от кривой очертания потенциальной диаграммы в соответственном месте благодаря влиянию добавочных токов, текущих в короткозамкнутых секциях и замыкающихся поперек щетки (см. А р н о л ь д, Динамомашины постоянного тока).

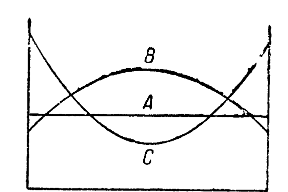
вления вращения генератора в положение *I*, мы получим диаграмму коммутации *I*, при которой разность потенциалов под сбегающим краем щетки увеличивается; при таком положении щетки, как известно, получается замедленная коммутация.

Таким образом мы видим, что тип диаграммы коммутации *I*, полученный для положительной щетки машины, работающей генератором, указывает на замедленную коммутацию; характерной особенностью кривой *I* при этом является увеличенная разность потенциалов под сбегающим краем щетки. Тип коммутационной диаграммы *II*, при которой получается одинаковая разность потенциалов для сбегающего и набегающего края щетки, указывает на то, что щетки расположены в действительно нейтральной зоне. Получив коммутационную диаграмму типа *III*, при котором наблюдается увеличенная разность потенциалов под набегающим краем щетки, мы можем ожидать в испытуемой машине ускоренной коммутации.

Как видно из этих кривых, в разных точках коллектора под щеткой эти падения напряжения получаются разными; это происходит от того, что потенциальная кривая имеет криволинейное очертание; если бы машина остановилась и мы бы стали пропускать через якорь ток от какого-нибудь внешнего источника электрической энергии, то мы бы получили вместо кривых *I*, *II* и *III* на фиг. 170 прямоугольники, у которых верхняя сторона параллельна оси абсцисс.



Фиг. 171. Типичные щеточные диаграммы.



Фиг. 172. Щеточные диаграммы при различной форме полюсных наконечников дополнительного полюса.

Средняя ордината кривых *I*, *II*, *III* на фиг. 170 меняется с нагрузкой машины; при увеличении нагрузки падение напряжения в щетках увеличивается и в соответствии с этим ординаты кривых *I*, *II*, *III* возрастают.

При работе испытуемой машины двигателем к положительной щетке коллектора будет притекать ток извне, и ее потенциал будет выше потенциала коллектора в данной точке; поэтому коммутационные диаграммы машины, работающей двигателем, для положительных щеток будут представлять собой зеркальные *изображения* кривых с отрицательными ординатами (см. кривые *I'*, *II'*, *III'* на фиг. 171).

На фиг. 171 показаны типичные коммутационные диаграммы для положительных щеток машины, работающей генератором (верхние кривые), и машины, работающей двигателем (нижние кривые); кривые *I* характеризуют замедленную коммутацию, кривые *III* — ускоренную.

Описанный здесь способ экспериментального исследования коммутации, дающей указания на характер работы машины в смысле искрообразования на коллекторе, оказался чрезвычайно удобным на практике и довольно часто применяется.

Кривые, изображенные на фиг. 171, относятся к машине, не имеющей дополнительных полюсов.

Дополнительные полюса дают возможность влиять на очертание потенциальной диаграммы под щетками.

Идеальные условия для коммутации получаются, когда все коллекторные пластины, находящиеся в момент коммутации под щеткой, имеют один и тот же потенциал.

В этом случае в короткозамкнутых щеткой секциях не возникает дополнительных токов, замыкающихся поперек щетки, плотность тока по всей контактной

поверхности щетки получается одинаковая и коммутация совершается без искрения.

На фиг. 172 прямая *A* относится к этому идеальному случаю. На практике бывает довольно трудно подогнать форму кривой полюсного наконечника дополнительного полюса таким образом, чтобы реактивное напряжение было компенсировано в каждый данный момент коммутации; при этом в машине с дополнительными полюсами вместо идеальной кривой *A* получаются обыкновенно кривые типа *B* или *C*.

Кривая *B* указывает на то, что магнитная индукция в воздушном зазоре под серединой дополнительного полюса чересчур велика.

Кривая типа *C*, наоборот, дает указание на то, что поле под серединой дополнительного полюса чересчур слабо.

ГЛАВА ВОСЬМАЯ

ОПЫТЫ АВТОРА

§ 80. Распределение тока в различных частях контактной поверхности щетки. В предыдущем было проведено опытное исследование переходного сопротивления всей контактной поверхности щетки при ее работе на коллекторе. Весьма интересным является также выяснить величину переходного сопротивления в отдельных местах контактной поверхности щетки. Как известно, полного равенства плотности тока в разных частях контакта щетки возможно достичь только в условиях идеальной коммутации; в действительности же, как показывает опыт, края щетки будут нагружены почти всегда неодинаковыми токами вследствие существования в цепи якорных секций, замкнутых на короткое щеткой, некоторых добавочных э. д. с. самоиндукции, которые служат причиной появления добавочных паразитных токов; последние, складываясь с рабочим током, текущим под одним краем щетки, и вычитаясь под другим краем щетки, вызывают неравномерное распределение плотности тока в контакте. Как известно, в случае замедленной коммутации сбегающий край щетки всегда будет больше нагружен у машин, работающих генератором; в случае же ускоренной коммутации, наоборот, нагруженным большей плотностью тока оказывается набегающий край щетки.

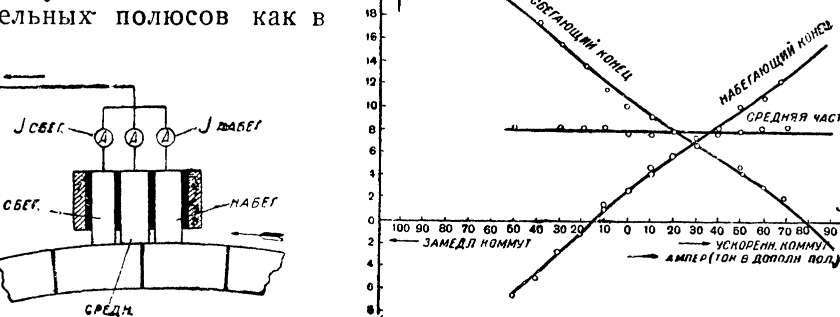
Как показывает вышеуказанное, для выяснения характера коммутации является чрезвычайно важным знать плотность тока во всех точках щеточного контакта при работе машин. Арнольд пытался экспериментально найти величину этой плотности тока, наблюдая падение напряжения между различными точками щеточного контакта и вращающимся коллектором. Однако, как показали его опыты, искрение на коллекторе чрезвычайно затушевывает явление, и таким образом, изучение происходящего в щеточном контакте по методу напряжения приводит к неверным представлениям. Автор настоящей книги подошел к задаче опытного определения плотности тока в контакте щетки иным образом. Расположение нового опыта ясно на фиг. 173.

Одна из щеток машины постоянного тока была разрезана на три равные части, которые были соответствующим образом изолированы одна от другой и затем опять связаны в одну щетку; последняя была вставлена в изолированную от нее обойму щеткодержателя (фиг. 173).

Таким образом можно было выделить и наблюдать явления, происходящие в отдельных частях рабочего контакта щетки: набегающей, средней и сбегающей части.

Ток, притекающий к отдельным частям щетки, можно было наблюдать при помощи трех амперметров.

Для выяснения влияния коммутации тока на величину переходного сопротивления щетки дополнительные полюса испытуемой машины были приключены к независимой цепи, что давало возможность регулировать величину и менять направление тока в обмотке этих полюсов. При этом можно было исследовать распределение тока в разрезной щетке при любых возбуждениях дополнительных полюсов как в случае замедленной, так и ускоренной коммутации. На фиг. 174 представлены кривые зависимости токов средней части контакта щетки, в набегающем и сбегающем ее конце, в функции тока в дополнительных полюсах $I_{доп}$ при постоянном токе якоря $I_a = 40$ А.



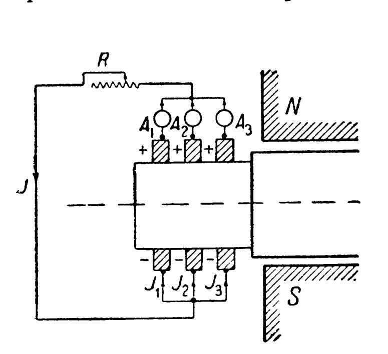
Фиг. 173. Опытная щетка.

Фиг. 174. Ток в различных частях составной щетки согласно фиг. 173 при изменении тока в дополнительных полюсах.

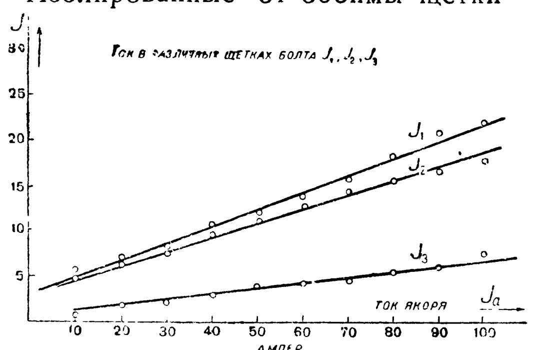
Полученные кривые дают полную картину распределения тока в отдельных частях контакта щетки при различных условиях коммутации машины. Мы видим, что в то время как в средней части контакта щетки ток почти не меняется с изменением $I_{доп}$, ток в сбегающей и набегающей частях щетки в сильной степени зависит от величины $I_{доп}$: в области замедленной коммутации ($I_{доп} < I_a$) ток в сбегающей части щетки имеет большую величину, в области же ускоренной коммутации ($I_{доп} > I_a$) — ток больше на набегающем конце щетки, и, наконец, когда ток $I_{доп}$ приблизительно равен току якоря I_a, токи всех частей разрезной щетки приблизительно равны друг другу. Последнее указывает на равномерное распределение плотности тока под щеткой.

§ 81. Распределение тока между различными щетками, сидящими на общем болте. В предыдущем опытным путем было выяснено распределение тока в отдельных частях контактной поверхности одной из щеток щеточного болта работающей машины. Весьма интересно проследить также распределение рабочего тока машины между отдельными одноименными щетками, сидящими на одном общем щеточном болте. Одним из основных факторов, влияющих на распределение тока между отдельными щетками болта, может явиться неодинаковое нажатие щеток на коллекторе и различные механические дефекты этих щеток (сбитые концы, неодинаковая приработка и т. д.); в этих условиях как переходное сопротивление щеток, сидящих на одном болте, так и протекание коммутации тока под отдельными щетками может весьма заметно влиять на величину проходящих через них токов.

Для опытного выяснения сказанного была осуществлена схема, представленная на фиг. 175. Изолированные от обоймы щетки



Фиг. 175. Опытная схема.



Фиг. 176. Ток I_1, I_2, I_3 в разных щетках болта при изменении I_a (фиг. 175).

одного из щеточных пальцев машины присоединялись к общей нагрузочной цепи через амперметры A_1, A_2, A_3. Благодаря этому представилось возможным на работающей в обычных условиях машине измерить величины токов, идущих через отдельные щетки пальца.

На фиг. 176 приведено распределение токов I_1, I_2, I_3 между отдельными щетками, сидящими на общем пальце при различных токах якоря I_a. Мы видим, что токи отдельных щеток значительно разнятся друг от друга. До сих пор предполагалось, что ток щеточного болта равномерно распределяется между его щетками. В действительности же, как показывает опыт, вследствие неодинаковых контактных поверхностей щеточного болта в каждой щетке текут различные токи.

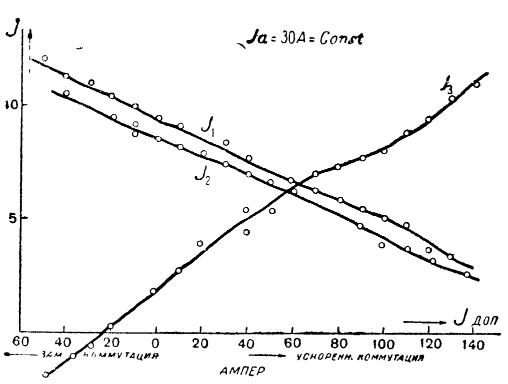
Для выяснения влияния коммутации тока на распределение тока между отдельными щетками щеточного пальца дополнительные полюса были приключены к независимой цепи, что давало возможность регулировать величину и менять направление тока в обмотке этих полюсов. При этом можно было исследо-

вать распределение тока в различных щетках щеточного пальца при любых возбуждениях дополнительных полюсов как в случае замедленной, так и ускоренной коммутации.

На фиг. 177 приведены в виде кривых результаты опытов. Весьма интересно отметить следующее:

Токи отдельных щеток в сильной степени зависят от величины тока дополнительного полюса $I_{доп}$. Только при безыскровой коммутации, когда $I_{доп} \approx I_a$, токи отдельных щеток щеточного болта равны друг другу. При замедленной коммутации $I_{доп} < I_a$ и при ускоренной коммутации $I_{доп} > I_a$ токи щеток становятся различными. Это до сих пор никем не отмеченное влияние коммутации на распределение тока в отдельных щетках щеточного болта автор настоящей книги объясняет следующим образом (§ 82):

§ 82. Явление неодинакового распределения тока между щетками, сидящими на общем болте; объяснение явления автором. При работе машины щетки обычно прирабатываются на коллекторе несовершенно, так что щетки обычно работают только одним своим краем. На фиг. 178 в виде примера в сильно утрированном виде показаны две сидящие на одном щеточном болте щетки A и B, из которых щетка A работает только краем a, а щетка B—краем b. Щетка B для ясности на фиг. 178 показана заштрихованной. На фиг. 178 слева показан добавочный ток i, вызванный той э. д. с. самоиндукции, которая наводится в короткозамкнутой секции в момент коммутации. Как видно из фиг. 178, путь этого тока i следующий:



Фиг. 177. Токи I_1, I_2, I_3 в разных щетках болта при изменяющемся токе дополнительных полюсов.

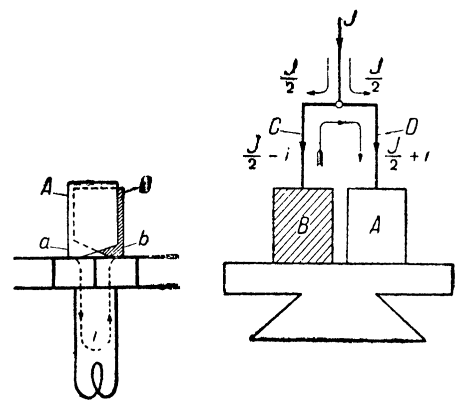
Ток i из левой коллекторной пластины входит в край b щетки B, затем течет по соединительному проводу CD, входит в щетку A, через ее край a входит в левую коллекторную пластину и возвращается таким образом в секцию. На фиг. 178 стрелками также показано направление рабочего тока I, притекающего к щеткам A и B; как видно из этой фигуры, ток I в точке разветвления разделяется на две приблизительно равные[1] части $I/2$; если бы добавочного тока i не было, то в каждой щетке A и B текли бы одинаковые токи $I/2$; благодаря, однако,

[1] Ток I в точке разветвления делится между щетками A и B на две равные части при условии, что контактные сопротивления краев a и b щеток A и B одинаковы.

существованию добавочного тока i в щетке B теперь будет течь разность токов $I/2-i$, а в щетке A — сумма $I/2+i$. Таким образом мы видим, что при таких условиях равномерность распределения токов между обеими щетками A и B, сидящими на одном щеточном болте, нарушится.

Если бы обе щетки A и B всегда работали одинаково всей своей контактной поверхностью, добавочный ток коммутации замыкался бы поперек каждой щетки A и B в отдельности, не заходя совсем в соединительный провод CD, и не вызывал бы перераспределения тока между щетками A и B[1].

Таким образом мы видим, что неравномерность распределения тока между щетками A и B, сидящими на общем болте, зависит от характера коммутации машины и степени приработки щеток.



Фиг. 178. Неправильно приработанные щетки.

Чем хуже коммутация, тем больше добавочный ток i и тем неравномернее распределяется рабочий ток между щетками, сидящими на общем болте.

В машинах с дополнительными полюсами, надлежащим образом возбужденными, величина добавочного тока коммутации i обычно невелика, и поэтому в таких машинах рабочий ток приблизительно равномерно распределяется между всеми щетками, сидящими на одном щеточном болте. Замечательно то, что эта равномерность распределения тока не нарушается также и при разных изменениях нагрузки машины, — это обстоятельство необходимо особенно здесь подчеркнуть; оно характеризует положительное влияние дополнительных полюсов на работу машины с совершенно новой точки зрения.

Таким образом дополнительные полюса оказывают полезное влияние на работу машины не только в смысле равномерного распределения плотности тока в рабочем контакте каждой отдельной щетки, но они также содействуют тому, что ток делится приблизительно поровну между всеми щетками, сидящими на общем щеточном пальце.

При отсутствии дополнительных полюсов, как показали вышеописанные опыты автора, ток между одноименными щетками, сидящими на общем пальце, делится, вообще, неравномерно; при этом эта неравномерность тем больше, чем больше

[1] В большинстве случаев на практике, однако, постоянно приходится встречаться с вышеуказанной, не совсем равномерной, приработкой контактной поверхности щеток.

те токи, которые вызываются реактивным напряжением внутри секции, т. е. чем хуже коммутация.

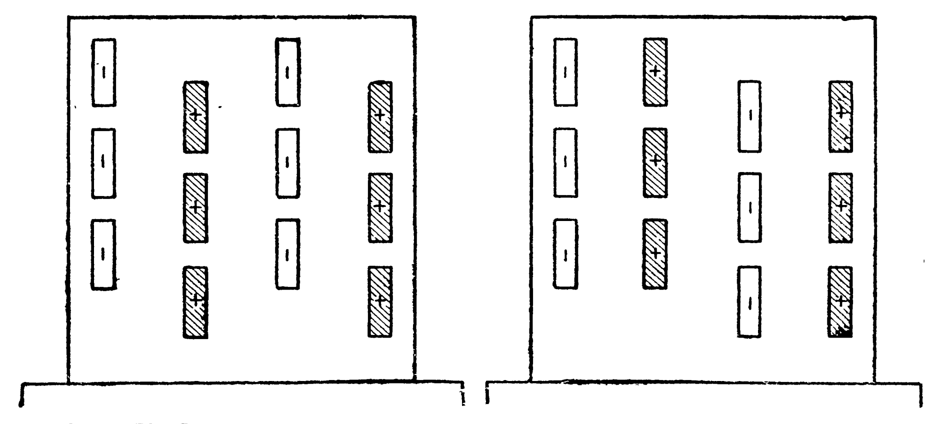
Таким образом открывается новое свойство дополнительных полюсов: они регулируют равномерность распределения тока между одноименными щетками, сидящими на общем пальце.

Это замечательное свойство дополнительных полюсов еще не было до сих пор никем отмечено.

ГЛАВА ДЕВЯТАЯ

КОЛЛЕКТОР И ЩЕТКИ

§ 83. О рациональном расположении щеток на коллекторе. Для более равномерного срабатывания коллектора при работе



Фиг. 179. Старое расположение щеток на коллекторе.

Фиг. 180. Новое расположение щеток на коллекторе.

обычно немного смещают щетки в аксиальном направлении друг относительно друга на некоторую величину.

На фиг. 179 показано примерное расположение щеток, применявшееся обычно раньше. На фиг. 180 показано другое расположение, которое рекомендуется обычно в настоящее время.[1]

При последнем расположении (фиг. 180) получается лучшая приработка щеток и более равномерное срабатывание рабочей поверхности коллектора.

Если бы срабатывание щеток и коллектора исключительно зависело только от трения, расположение фиг. 180 не представляло бы собой никакого преимущества по сравнению с расположением фиг. 179.

Однако опыт показывает, что разъедание рабочей контактной

---

[1] См. „The Electric Journal“ № 6, 1930, стр. 371.

поверхности щеток вследствие миниатюрных вольтовых дуг в контакте происходит в большей степени в положительных щетках, чем в щетках отрицательных [1].

Поэтому при расположении щеток согласно фиг. 179, которое характеризуется тем, что щетки одинаковой полярности занимают совершенно одинаковое расположение на коллекторе в смысле их осевых смещений, щетки одной полярности будут срабатывать коллектор по одним и тем же путям; если процессы нагрева и образования вольтовых дуг под щетками разных полярностей, как было сказано, будут неодинаковы, то срабатывание цилиндрической поверхности при этом будет происходить вдоль оси коллектора неодинаково.

При расположении щеток согласно фиг. 180 срабатывание коллектора будет происходить более равномерно.

§ 84. Токораспределение между одноименными щеткодержателями волновой и петлевой обмоток. Как было выяснено выше, в волновых обмотках все одноименные щетки оказываются соединенными параллельно внутри обмоток при посредстве самых секций обмотки. В таких обмотках ток распределяется между параллельно соединенными одноименными щетками соответственно их контактным сопротивлениям; к тем щеточным болтам, щетки которых имеют большое сопротивление контакта, притекает меньший ток, и наоборот. Таким образом при волновых обмотках мы получаем так называемое избирательное (или „селективное“) токораспределение между одноименными щеточными пальцами.

При таких условиях может возникнуть опасность перегрузки отдельных групп одноименных щеток при работе машины. Последнее находится в тесной связи с явлением отрицательного температурного коэфициента сопротивления контакта угольных щеток. Отрицательный температурный коэфициент сопротивления контакта щеток может быть причиной большой неравномерности распределения тока между одноименными щеточными болтами. Для пояснения рассмотрим фиг. 181, где изображен коллектор с одноименными щетками *1-2-3-4* (щетки противоположной полярности на фигуре не показаны).

Как видно из фиг. 181, щетки *1-2-3-4* соединены между собой параллельно; токи одноименных болтов i_1, i_2 и i_3, i_4, притекающие к коллектору, будут здесь устанавливаться обратно пропорционально сопротивлениям контактных сопротивлений щеток.

Предположим теперь, что в такой многополюсной машине с волновой обмоткой якоря почему-либо начала перегружаться чрезмерно большим током i_1 группа щеток какого-нибудь щеточного болта *1* (фиг. 181). В связи с возрастанием тока i_1 будет при этом падать сопротивление контакта щеток *1*, что вызовет

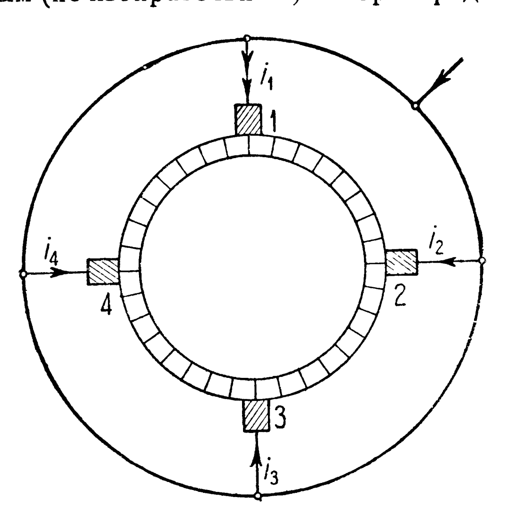
---

[1] В случае работы машины генератором. При работе машины двигателем разъедание контактной поверхности получается больше для щеток отрицательных, так как в этом случае горячим катодом, излучающим электроны, является контактная поверхность отрицательной щетки.

дальнейшее возрастание тока i_1; токи остальных щеточных болтов i_2, i_3 и i_4 при этом соответственно уменьшатся. Перегруженная бо̀льшим током щетка *1* при этом будет чрезмерно разогреваться и искрить. Описанная здесь опасность перегрузки отдельных щеток растет с увеличением числа последних.

Для уменьшения опасности неравномерного распределения тока между одноименными щетками иногда приходится включать небольшие омические сопротивления между щеточными болтами и сборными кольцами.

В случае петлевых обмоток (без уравнительных соединений) мы имеем дело с принужденным (не избирательным) токораспределением между одноименными щеточными болтами. Здесь ток между отдельными щеточными болтами на коллекторе распределяется более или менее равномерно, почти не завися от величины сопротивлений контакта отдельных щеток. Причина такого поведения машины, как было выяснено выше, заключается в том, что ампервитки реакции якоря той ветви обмотки якоря, которая перегружается сильнее, действуют размагничивающим образом на ту пару полюсов, под которыми данная ветвь находится, что умеряет э. д. с. и ток в данной ветви.



Фиг. 181. Коллектор с одноименными щетками.

§ 85. Подвод тока к щеточному стержню. Собирательные кольца, подводящие ток к одноименным щеточным болтам, могут быть расположены или со стороны петушков или со стороны подшипника, как показано на фиг. 182 и 183.

Возникает вопрос, какое из этих расположений является наиболее целесообразным.

Можно показать, что расположение собирательного кольца со стороны подшипника является более рациональным (фиг. 183).

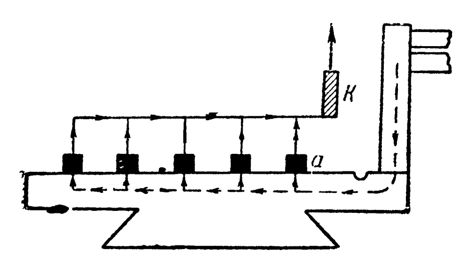
Действительно, при расположении собирательных колец со стороны петушков мы будем иметь неравномерную нагрузку щеток, сидящих на стержне.

Для выяснения причины этого рассмотрим фиг. 182. Из этой фигуры видно, что путь тока из петушка к крайней левой щетке коллектора длиннее, чем к правой щетке, расположенной у самого петушка, поэтому крайняя левая щетка здесь будет недогружена и правая щетка вблизи собирательного кольца перегружена бо̀льшим током.

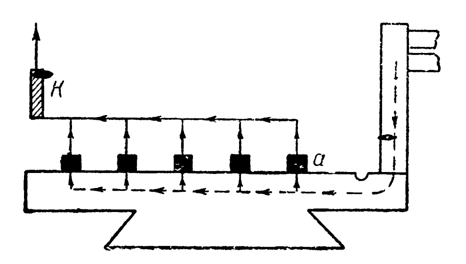
При расположении собирательного кольца со стороны под-

шипника мы устраним неодинаковость сопротивлений и получим равномерное распределение тока между щетками стержня (фиг. 183).

Расположение фиг. 183 обладает, однако, недостатком в случае высоковольтных машин, обусловленном близким к подшипнику расположением собирательного кольца, благодаря чему облегчается возможность появления вольтовой дуги на корпус при авариях.



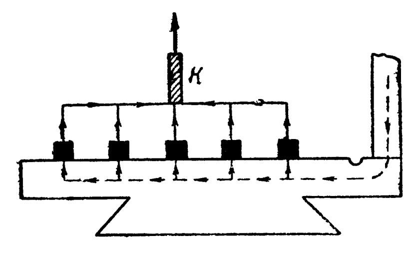
Фиг. 182. Собирательные кольца, подводящие ток к одноименным щеткам, расположены со стороны петушков.



Фиг. 183. Собирательные кольца, подводящие ток к одноименным щеточным болтам, расположены со стороны подшипника.

Среднее расположение собирательного кольца согласно фиг. 184 дает компромиссное решение.

§ 86. Выбор плотности тока в щетках. В настоящее время встречаются машины постоянного тока с током, достигающим 12000—15000 А.



Фиг. 184. Среднее расположение собирательного кольца.

На коллекторе мощной машины на такой громадный ток должно быть расположено много сотен щеток: ведь, через щетки должен быть проведен весь поток энергии, соответствующий полной мощности машины.

Очень важно для правильной эксплоатации машины, чтобы плотность тока под всеми щетками, даже если они имеются в таком громадном числе, была всюду более или менее одинакова.

Однако добиться одинакового распределения тока между всеми одноименными щетками является не всегда легкой задачей.

Затрудняющим обстоятельством здесь является своеобразное поведение угольных щеток при изменении величины протекающего через них тока; как было указано выше, в угольных щетках понижается сопротивление контакта при возрастании тока.

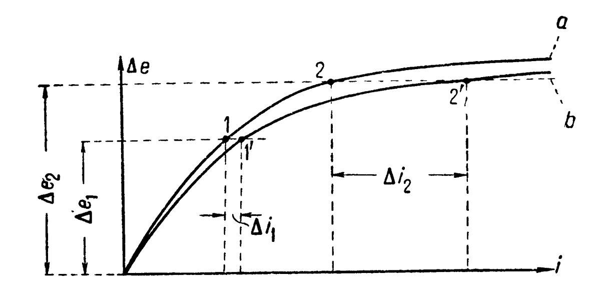
Если из нескольких щеток, сидящих на общем щеточном болте и соединенных между собой таким образом параллельно, одна щетка почему-либо окажется несколько перегруженной, [1]

[1] Например, вследствие повышенного давления пружины.

то произойдет следующее: контактное сопротивление этой щетки понизится, что вызовет соответственное увеличение тока в щетке, возросший ток вызовет дальнейшее уменьшение сопротивления контакта, что повлечет за собой дальнейшее увеличение тока и т. д. В результате может иногда оказаться, что большая часть тока щеточного болта бросится в одну щетку, в то время как другие щетки того же болта окажутся разгруженными. Перегруженная щетка при этом будет раскаливаться и искрить.

Причина такого неустойчивого поведения щеток заключается в том, что температурный коэфициент сопротивления контакта щеток имеет отрицательную величину. Если бы удалось найти такой состав щеток, при котором температурный коэфициент сопротивления контакта имел бы положительное значение, вышеописанного явления неустойчивого распределения тока между параллельно соединенными щетками не было.

Однако, к сожалению, только редко применяемые металлические щетки имеют положительный температурный коэфициент контактного сопротивления.



Фиг. 185. Кривая зависимости падения напряжения в щеточном контакте Δe и плотности тока в контакте.

Все же есть средство, гарантирующее (более или менее) равномерное распределение тока и между параллельно соединенными угольными щетками.

Оно заключается в том, что плотность тока в контакте угольных щеток выбирается не очень большой.

Обращаясь к фиг. 185, где изображена кривая зависимости падения напряжения в щеточном контакте Δe и плотности тока в контакте S_b, мы видим, что при малых S_b эта кривая имеет характер прямой, круто поднимающейся кверху от начала координат.

Отсюда следует, что при малых плотностях тока падение напряжения в щеточном контакте резко повышается при возрастании тока, что способствует равномерному распределению тока между щетками и предотвращает неустойчивый характер работы щеточной системы в целом.

Для пояснения сказанного предположим, что у нас на одном щеточном пальце сидят две угольные щетки, из которых одна немного сильнее нажата пружиной к коллектору, чем другая.

В результате последнего характеристики этих двух щеток *a* и *b* будут отличаться друг от друга, как показано на фиг. 185.

Если плотность тока в контактах этих щеток будет мала, то и падение напряжения в них Δe_1 будет также мало.

Проводя горизонталь на расстоянии Δe_1 от оси абсцисс, мы

получим две точки пересечения *1* и *1'*, мало сдвинутые друг относительно друга.

Таким образом мы видим, что при малых плотностях тока разница в токах Δi_1 будет вообще невелика (т. е. щетки будут нагружены более или менее равномерно).

Наоборот, при больших плотностях тока токи, текущие в отдельных щетках, могут отличаться друг от друга на значительную величину.

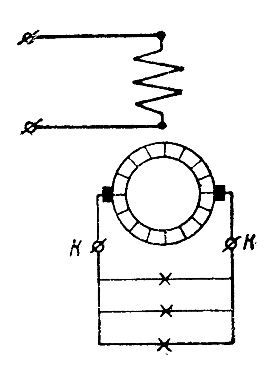
Последнее положение поясняет фиг. 185, из которой видно, что горизонталь, проведенная на расстоянии Δe_2 от оси абсцисс, пересекает кривые в точках *2* и *2'*, которые отстоят теперь друг от друга на большое расстояние, равное Δi_2.

Из всего изложенного ясно, что при больших перегрузках аварийного характера и коротких замыканиях машины всегда возможна значительная перегрузка отдельных щеток или отдельных групп щеток, что может повлечь за собой при этих условиях опасное искрение и „круговой огонь" на коллекторе.

ГЛАВА ДЕСЯТАЯ

ВОЗБУЖДЕНИЕ

§ 87. Независимое возбуждение. Независимое возбуждение, схема которого дана на фиг. 186, применяется в настоящее время в довольно редких случаях: когда напряжение самой машины является неподходящим для питания обмотки возбуждения (например, в машинах или очень высокого напряжения, или очень низкого — для электрохимических целей) или когда необходимо иметь возможность регулировать напряжение в очень широких границах. Эта система возбуждения применяется также для машин турбогенераторного типа, у которых станина и полюса изготовляются из листового железа, благодаря чему машина теряет способность самовозбуждения.



Фиг. 186. Независимое возбуждение.

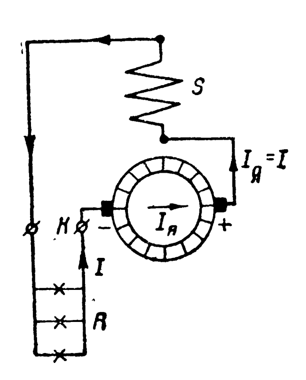
§ 88. Последовательное возбуждение. В первых машинах с самовозбуждением (принцип которого был открыт В. Сименсом в 1867 г.) обмотки электромагнитов *S* соединялись последовательно с якорем, как показано на фиг. 187; такие машины носят название машин последовательного возбуждения (series).

Для того чтобы машина могла возбудить себя, необходимым условием является, чтобы станина машины была изготовлена из чугуна или стального литья с большой задерживающей силой. Прежде чем машина впервые будет пущена в ход, по обмотке ее электромагнитов на короткое время должен быть пропущен

ток от какого-нибудь постороннего источника электрической энергии.

По выключении тока обмотки возбуждения магнитный поток машины не падает до нуля,—остается еще так называемое остаточное поле, которое дает возможность машине возбуждать самое себя.

Соединив зажимы машины (фиг. 187) с каким-нибудь внешним сопротивлением R и приведя машину во вращение, мы увидим, что в цепи машины течет слабый ток, вызванный остаточным полем; этот слабый ток потечет по обмотке возбуждения и усилит магнитный поток; благодаря увеличению магнитного потока э. д. с. машины возрастает, что в свою очередь вызывает дальнейшее усилие тока; усилившийся ток вызывает еще бо́льшее возрастание магнитного потока и т. д.; при вращении машины магнитный поток и э. д. с. будут постоянно возрастать, пока магниты машины не будут в достаточной степени насыщены, после чего наступит состояние равновесия. [1]

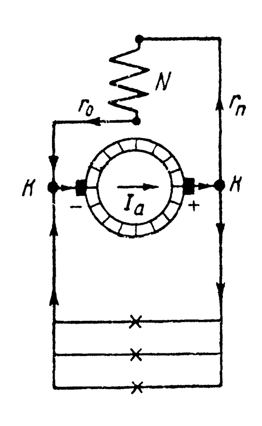


Фиг. 187. Последовательное возбуждение.

В генераторах последовательного возбуждения напряжение возрастает с увеличением нагрузки.

Так как одно из главных требований к генераторам, работающим на современных центральных станциях, в настоящее время заключается в постоянстве напряжения на зажимах, то генераторы последовательного возбуждения теперь почти совершенно на практике не применяются.

Наоборот, для возбуждения двигателей последовательное соединение применяется, как будет видно ниже, довольно часто.



Фиг. 188. Шунтовое возбуждение.

§ 89. Параллельное возбуждение.

Все современные генераторы, работающие на центральных станциях, имеют параллельное возбуждение или смешанное.

Схема генератора параллельного (или шунтового) возбуждения изображена на фиг. 188.

Впервые это возбуждение было осуществлено Сименсом в 1880 г. Характерной особенностью машины параллельного возбуждения, как это будет видно ниже, является то, что напряжение машины при изменении нагрузки колеблется в сравнительно узких пределах.

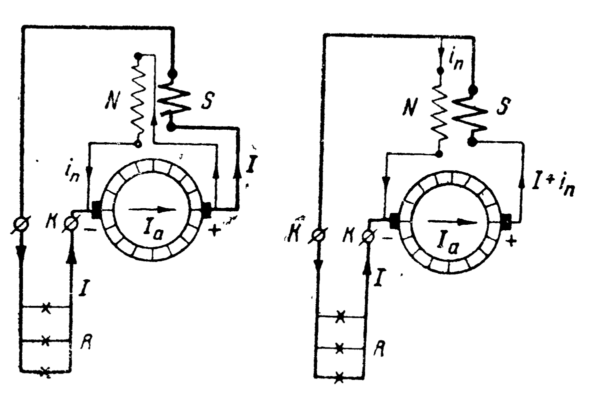
[1] Для того чтобы машина могла возбудить себя, необходимо, чтобы ток, текущий в обмотках электромагнитов, усиливал, а не ослаблял остаточное поле машины. Если окажется, что ток в электромагнитах ослабляет остаточное поле, необходимо изменить направление тока возбуждения, переключив концы обмотки электромагнитов.

§ 90. Смешанное и другие системы возбуждения. В машинах шунтового возбуждения напряжение у зажимов падает с увеличением нагрузки, в машинах же последовательного возбуждения оно возрастает.

Отсюда следует, что, соединяя оба метода возбуждения в одной машине и применяя так называемое смешанное (или компаундное) возбуждение, мы можем при известных условиях получить машину, у которой напряжение у зажимов при колебании нагрузки почти совсем не будет меняться.

Возможны два способа присоединения шунтовой обмотки N машины и последовательной S (фиг. 189 и 190).

На фиг. 189 шунтовая обмотка присоединена непосредственно к щеткам; при этом в обмотке главного тока S течет ток внешней цепи I, равный разности якорного тока I_a и тока шунта i_n.



Фиг. 189. Смешанное возбуждение.

Фиг. 190. Смешанное возбужение.

На фиг. 190 показан второй возможный способ присоединения шунтовой обмотки, а именно — к главным клеммам K и K машины; в этом случае в последовательной обмотке S течет ток якоря I_a, равный сумме тока сети и шунтового: $I + i_n$.

Смешанное возбуждение было предложено Марселем Депре.

Зенгель (Sengel) предложил особый способ присоединения шунтовой обмотки, при котором напряжение на зажимах обмотки получается вдвое меньше, чем напряжение машины.

На фиг. 191 показана схема возбуждения по Зенгелю.

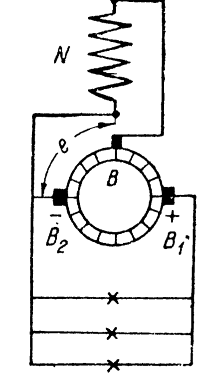
Обмотка возбуждения N приключается одним своим концом к щетке на коллекторе B_2, а другим концом — к щетке B, расположенной на контактном кольце S, которое соединено с какой-нибудь из пластин коллектора.

При вращении якоря напряжение между щетками B_2 и B будет колебаться между нулем и полным напряжением машины; если к щеткам присоединить обмотку возбуждения N, обладающую большой самоиндукцией, то в этой обмотке потечет пульсирующий ток, который будет тем ближе походить на постоянный ток, чем больше самоиндукция; можно доказать, что ток в обмотке N будет составлять половину того тока, который в ней протекал бы при питании обмотки N от главных щеток B_1 и B_2.

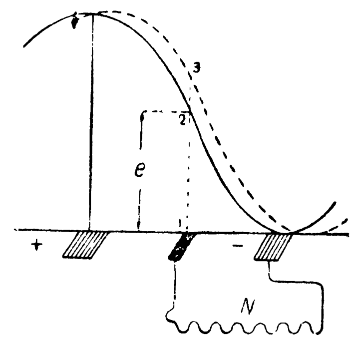
На фиг. 192 показан другой метод возбуждения, предложенный Сейерсом (Syers).

Приблизительно посередине между двумя главными щетками B_1 и B_2 на коллекторе расположена вспомогательная щетка B; обмотка возбуждения N присоединяется к щеткам B_2 и B. При таком соединении обмотки получается компаундирующее действие, в чем можно убедиться, рассматривая фиг. 193; на этой фигуре изображена часть потенциальной кривой между щетками B_1 и B_2. При нагрузке машины потенциальная диаграмма деформируется, и вместо сплошной кривой мы получаем кривую, изображенную на фиг. 193 пунктиром. Из этой фигуры видно, что разность потенциалов e на зажимах обмотки возбуждения при увеличении нагрузки увеличивается с величины 1—2 до величины 1—3, благодаря чему ток в обмотке возбуждения тоже возрастает.

Фиг. 191. Возбуждение по Зенгелю.



Фиг. 192. Возбуждение по Сейерсу.



Фиг. 193. Часть потенциальной кривой между щетками.

Недостатком этого способа возбуждения является щетка B, которая, будучи расположена под серединой полюса, обладает наклонностью к искрению.

Методы возбуждения по Зенгелю и Сейерсу не нашли на практике распространения [1].

Кроме описанных в этом параграфе двух методов возбуждения еще применяется целый ряд других методов в машинах специального назначения (для освещения поездов, прожекторов и т. д.), об этих схемах будет речь ниже.

ГЛАВА ОДИННАДЦАТАЯ

ХАРАКТЕРИСТИКИ ГЕНЕРАТОРА ПОСТОЯННОГО ТОКА

§ 91. Характеристики генератора независимого возбуждения.

а) Характеристика холостого хода. Характеристика холостого хода представляет собой зависимость между э. д. с.

[1] В специальных машинах искажение потенциальной кривой при нагрузке используется часто, например, в трехщеточной динамо с питанием обмотки возбуждения по методу Сейерса.

E_a машины и током возбуждения i_n при постоянном числе оборотов машины ($n = \text{const}$) и разомкнутой внешней цепи.

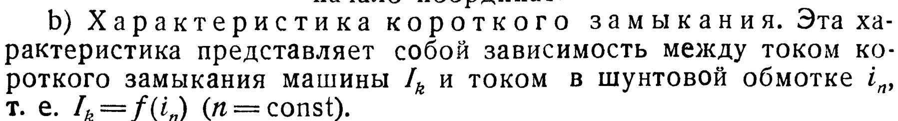
Эта кривая характеризует магнитные свойства машины и имеет очень важное значение, так как из нее путем простых графических построений, о чем речь будет ниже, может быть выведено большинство остальных характеристичных кривых.

Схема соединений, которой приходится пользоваться при снятии кривой холостого хода, показана на фиг. 194.

На фиг. 195 показана примерная кривая холостого хода для прямого хода *I* и обратного *II*, кривые *I* и *II* не совпадают вследствие влияния остаточного магнетизма; этим же явлением остаточного магнетизма объясняется то, что эти кривые *I* и *II* не проходят через начало координат, а пересекают начальную ординату выше нулевой точки.

Фиг. 194. Опытная схема при снятии характеристики холостого хода.

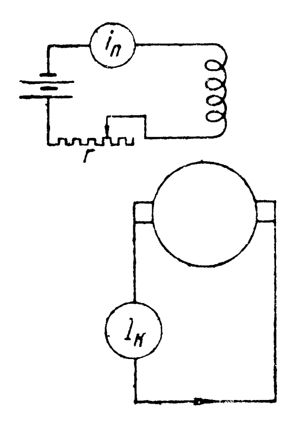
При всех графических построениях, указанных ниже, мы предполагаем, что характеристика холостого хода проходит через начало координат.



b) Характеристика короткого замыкания. Эта характеристика представляет собой зависимость между током короткого замыкания машины I_k и током в шунтовой обмотке i_n, т. е. $I_k = f(i_n)$ ($n = \text{const}$).

Схема соединений генератора при опыте короткого замыкания показана на фиг. 194а.

Само собой разумеется, что при этом опыте сопротивление r в цепи возбуждения должно быть достаточно велико во избежание чрезмерно большого тока короткого замыкания I_k.



Фиг. 194а.

Так как при малых токах возбуждения i_n магнитное насыщение машины невелико, то характеристика короткого замыкания при этих условиях получает очертания прямой линии, как показано на фиг. 194b.

Характеристика короткого замыкания обычно строится для определения величины реакции якоря, как показано ниже.

c) Опытное определение ампервитков реакции якоря. Реактивный треугольник. Ампервитки реакции якоря AW_r мы можем найти из опыта, если имеется характеристика холостого хода $E = f(i_n)$ и характеристика короткого замыкания $I_k = f(i_n)$.

На фиг. 194b обе эти характеристики построены.

Для опытного нахождения AW_r построение ведется в следующей последовательности.

Измерив предварительно омическое сопротивление якоря R_a (включая сюда и переходное сопротивление щеточного контакта), находим для какого-либо данного значения тока I_k величину падения напряжения $I_k R_a$.

Откладывая $I_k R_a$ по вертикали, находим по кривой E тот ток возбуждения i_k, который необходим для создания э. д. с. в якоре, равной этому падению напряжения $I_k R_a$.

На диаграмме фиг. 194b этот ток возбуждения выразится отрезком $0—2 = i_k$.

Затем откладываем по вертикали $I_k = 0—4$ и, проводя горизонталь, находим в пересечении с характеристикой короткого замыкания точку *5*.

Проводя вертикиль *5—3*, находим отрезок *2—3*, который представляет собой ампервитки реакции якоря, измеренные в амперах тока возбуждения.

Для нахождения ампервитков реакции якоря необходимо ток возбуждения в амперах помножить на число витков обмотки возбуждения W_m:

$$AW_r = i_r W_n.$$

Фиг. 194b.

Из фиг. 194b мы видим, что при коротком замыкании ток возбуждения машины или, вернее, ампервитки возбуждения, затрачиваются на то, чтобы, во-первых, скомпенсировать ампервитки реакции якоря AW_r и создать поток, достаточный для того, чтобы индуктированная э. д. с. машины уравновесила падение напряжения в цепи якоря $I_k R_a$.

Из фиг. 194b мы видим, что

$$i_k = I_k R_a \text{ и } i_r = AW_r.$$

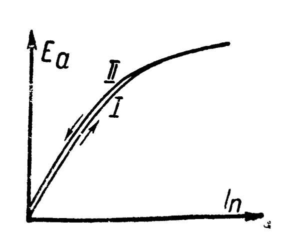
d) Нагрузочная характеристика. Нагрузочная характеристика представляет собою кривую зависимости между напряжением у зажимов машины U и током возбуждения i_n при постоянном числе оборотов ($n = \text{const}$) и постоянном токе во внешней цепи ($I = \text{const}$).

На фиг. 196 показана нагрузочная характеристика *II*, полученная из опыта. Эту кривую также можно построить, не производя опыта, если известна характеристика холостого хода.

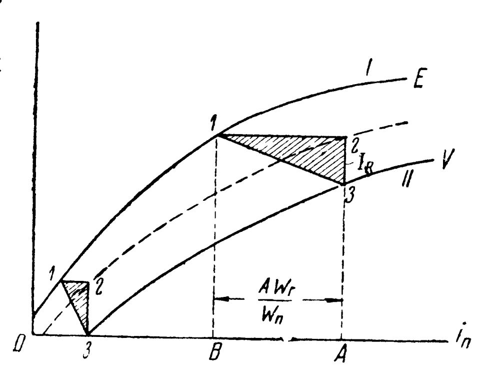
Предположим, что машина вращается вхолостую с возбуждением $i_n = OB$; этому возбуждению будет соответствовать по фиг. 196 напряжение на зажимах $B1$. Если теперь нагрузить машину током I, то напряжение должно упасть вследствие реакции якоря.

Откладывая вправо от точки 1 отрезок 1-2, равный $\frac{AW_r}{w_n}$, где AW_r — сумма ампервитков, компенсирующих размагничивающее действие продольного и поперечного поля якоря, и w_n — число витков обмотки возбуждения, найдем величину тока возбуждения $i_n = OA$, необходимого для поддержания при нагрузке машины э. д. с. на той же высоте, что и раньше.

Напряжение у зажимов машины U будет меньше э. д. с. на величину падения напряжения в арматуре I_aR_a; поэтому, откладывая вниз от точки 2 отрезок 2-3, равный I_aR_a, мы получим напряжение машины $U = A3$ при этих условиях. Таким образом мы видим, что точка 1 треугольника 1-2-3 лежит на кривой I, а точка 3—на кривой II.



Фиг. 195. Характеристика холостого хода.



Фиг. 196. Нагрузочная характеристика.

Поэтому, предполагая приближенно, что реакция якоря и падение напряжения при $I = \text{const}$ и меняющемся токе возбуждения остается постоянными, мы найдем, что при этих допущениях размеры „характеристичного треугольника“ 1-2-3 тоже должны остаться постоянными.

Следовательно, передвигая треугольник 1-2-3 параллельно самому себе таким образом, чтобы точка 1 все время касалась кривой I, мы увидим, что точка 3 при этом будет описывать искомую кривую II.

На самом же деле благодаря магнитному насыщению с увеличением возбуждения обычно число ампервитков, компенсирующих размагничивающее действие поперечных ампервитков якоря, возрастает, и кривая II по мере увеличения возбуждения все больше и больше удаляется от кривой I.

Зная из опыта нагрузочную характеристику II и характеристику холостого хода I, можно определить реакцию якоря машины.

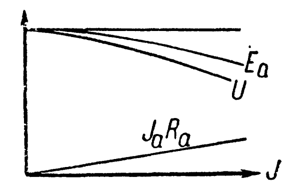
В точке кривой II, соответствующей данному возбуждению OA,

необходимо провести вверх ординату *2-3*, равную падению напряжения в якоре и щетках $I_a R_a$, и влево от точки *2* провести горизонталь *2-1* до пересечения с кривой *I*; тогда отрезок *2-1* в некотором масштабе будет равен числу ампервитков, компенсирующих размагничивающее действие продольного и поперечного поля якоря.

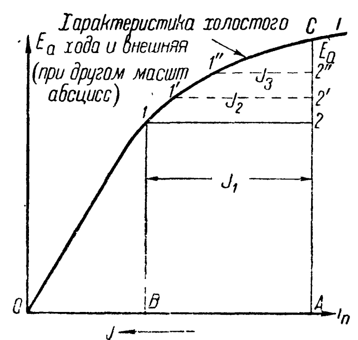
е) Внешняя характеристика. Под внешней характеристикой машины обычно подразумевают кривую зависимости между напряжением у зажимов машины *U* и током внешней цепи *I* при постоянном возбуждении и числе оборотов машины; на фиг. 197 показана эта характеристика *U*; прибавляя к ординатам кривой *U* величины падения напряжения в якоре и щетках $I_a R_a$, получим кривую зависимости между э. д. с. E_a машины и током — внутреннюю характеристику[1].

С помощью характеристики холостого хода можно построить внешнюю характеристику машины независимого возбуждения следующим образом (фиг. 198).

Сначала для простоты пренебрежем величиной падения напряжения в арматуре. Предположим,



Фиг. 197. Внутренняя E_a и внешняя *U* характеристики.



Фиг. 198. Построение внешней характеристики машины независимого возбуждения.

что ток возбуждения машины $i_n = OB$ (фиг. 198); тогда по кривой холостого хода *I* найдем соответственную величину э. д. с., равную *B1*.

Вычислим AW_r, равное числу ампервиток, компенсирующих реакцию якоря, и отложим $BA = \frac{AW_r}{w_n}$; тогда *OA* будет равно току возбуждения машины, нагруженной током I_1, при котором напряжение у зажимов машины будет *B1*.

Принимая, что ампервитки реакции якоря изменяются прямо пропорционально току, найдем, что отрезок *1-2* на фиг. 198 в некотором масштабе нам изобразит ток машины I_1.

Вычисляя реакцию якоря *1'-2'* для какой-нибудь другой нагрузки I_2, реакцию якоря *1''-2''* для тока I_3 и т. д. и откладывая эти отрезки влево от ординаты *AC*, найдем на кривой *I* точки *1'*, *1''* и т. д.; расстояние этих точек от оси абсцисс дает нам величины

[1] Выше было указано, что переходное сопротивление щеток изменяется при изменении плотности тока в щетках. В настоящем и во всех дальнейших построениях мы для упрощения предполагаем приближенно, что R_a представляет собой постоянную величину и не зависит от тока.

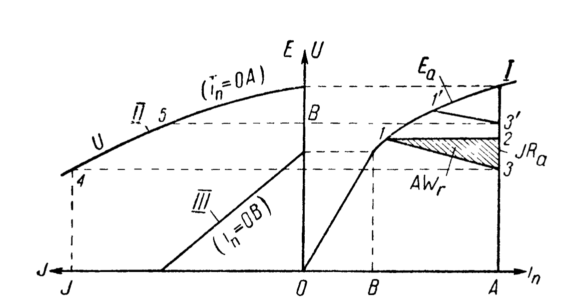
напряжений у зажимов машины при токах нагрузки, равных I_2, I_3 и т. д. (при $i_n = \text{const}$).

Отсюда мы видим, что при сделанных нами допущениях относительно реакции якоря и падения напряжения в арматуре самая кривая холостого хода *I* совпадает с кривой внешней характеристики; при этом необходимо только откладывать токи нагрузки *I* влево от ординаты *AC*; ток *AO* при этом будет соответствовать короткому замыканию машины.

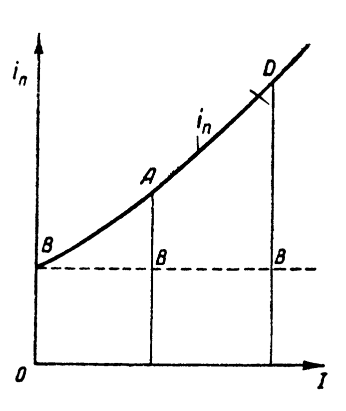
Само собой разумеется, что масштаб токов *I* при этом должен быть вполне определенный, отличный от масштаба токов возбуждения i_n.

На фиг. 199 дано построение внешней характеристики, принимая во внимание падение напряжения в арматуре; на этой фигуре означают: *I* — характеристика холостого хода, *II* и *III* — внешние характеристики, полученные путем построения на основании кривой *I*.

Отложим $OA = i_n =$ данному току возбуждения.



Фи . 199. Построение внешней характеристики.



Фиг. 200. Регулировочная характеристика.

Вычислим число ампервитков, компенсирующих реакцию якоря AW_r и падение напряжения $I_a R_a$ для данного тока *I*: построим треугольник *1-2-3*, где *2-3* в некотором масштабе равно падению напряжения $I_a R_a$ и *1-2* равно ампервиткам реакции якоря AW_r; тогда отрезок *A3* будет равен напряжению у зажимов *U*.

Отложив влево на фиг. 199 отрезок *OI* и, проводя горизонталь из точки *3* до пересечения с ординатой, проведенной из точки *I*, получим первую точку *4* внешней характеристики.

Если принять, что все стороны треугольника *1-2-3* изменяются прямо пропорционально току машины (что верно лишь приблизительно), то мы можем рассматривать гипотенузу этого треугольника как силу тока в некотором масштабе.

Поэтому для получения какой-нибудь другой точки внешней характеристики мы проводим прямую *1'-3'* параллельно прежней прямой *1-3*, и на горизонтали, проведенной через точку *3'*

влево, отложим отрезок $B5$, пропорциональный гипотенузе $1'$-$3'$; таким образом получим вторую точку 5 внешней характеристики и т. д.

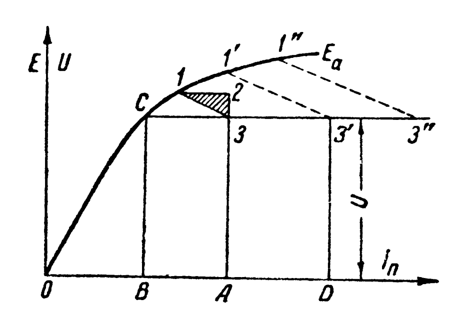
На фиг. 199 показана внешняя характеристика *III*, построенная для меньшей величины тока возбуждения $i_n = OB$.

Сравнивая кривые *II* и *III* между собой, замечаем, что кривая *III* протекает значительно круче, чем *II*, т. е. на этом примере мы видим, что колебание напряжения при изменении нагрузки в машине, слабо возбужденной и работающей в прямолинейной части характеристики, получается больше, чем в машине сильно насыщенной; поэтому обычно электрические машины рассчитываются так, чтобы их нормальная работа происходила в насыщенной части кривой намагничивания.

f) Регулировочная характеристика. Для того чтобы поддерживать напряжение на зажимах машины при разных нагрузках постоянным, необходимо с увеличением нагрузки машины соответственным образом увеличивать также токи возбуждения. Кривая изменения тока возбуждения в зависимости от нагрузки машины, работающей при постоянном напряжении и постоянном числе оборотов, носит название регулировочной характеристики (фиг. 200).

Эта кривая, так же как и все предыдущие, может быть найдена путем графического построения из кривой холостого хода.

Графическое построение этой кривой дано на фиг. 201.



Фиг. 201. Графическое построение регулировочной характеристики.

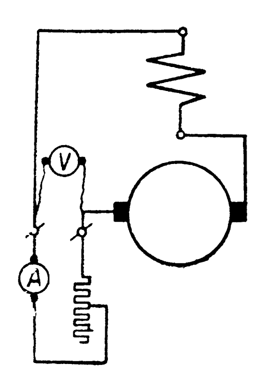
Предположим, что нам необходимо поддерживать постоянное напряжение U; проводим горизонталь через точку C на расстоянии от оси абсцисс, равном величине U. Для какой-нибудь нагрузки I_1 строим характеристичный треугольник 1-2-3, в котором вертикальный катет 2-3 равен I_1R_a, а горизонтальный 1-2 равен AW_r, точку 1 этого треугольника перемещаем по кривой холостого хода до тех пор, пока точка 3 не совпадет с прямой $C3'$, тогда отрезок OA дает нам величину тока возбуждения, который необходимо установить, чтобы при силе нагрузочного тока I_1 напряжение у зажимов осталось прежним U.

Для того чтобы определить величины добавочных токов возбуждения при разных нагрузках, проводим целый ряд линий $1'$-$3'$, $1''$-$3''$ и т. д., параллельных гипотенузе 1-3 характеристичного треугольника; тогда отрезки 1-3, $1'$-$3'$ и т. д. в некотором масштабе изображают нам нагрузочные токи I_1, I_2 и т. д., а отрезки $C3$, $C3'$ и т. д. — соответственные добавочные токи возбуждения.

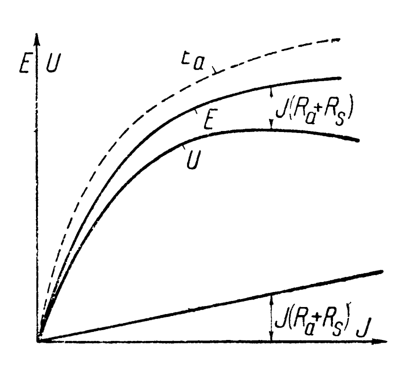
На основании этих данных построена регулировочная кривая на фиг. 200.

§ 92. Характеристики генератора последовательного возбуждения. а) Характеристика холостого хода. Так же как и для генераторов независимого возбуждения, здесь характеристика холостого хода может быть использована для построения всех других характеристик.

Для снятия характеристики холостого хода генератор последовательного возбуждения должен быть пущен вхолостую при



Фиг. 202. Генератор последовательного возбуждения.

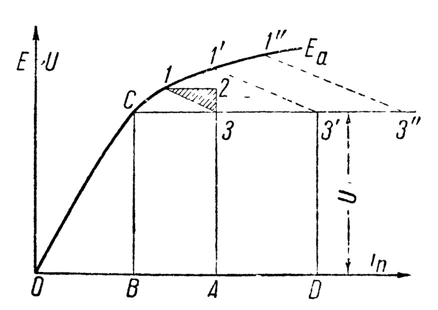


Фиг. 203. Внутренняя характеристика E и внешняя характеристика U.

независимом питании обмотки возбуждения; схема соединений при этом получается такая же, как на фиг. 194.

b) Внешняя характеристика. Для экспериментального получения этой характеристики служит схема фиг. 202.

На фиг. 203 показана внешняя характеристика (кривая U); прибавляя к ординатам этой кривой величину падения напряжения в якоре и последовательной обмотке I (R_a+R_s), получим другую кривую — внутреннюю характеристику, которая дает зависимость между током I и э. д. с. E машины (кривая E).



Фиг. 204. Способ построения внешней характеристики U генератора последовательного возбуждения.

На той же фигуре показана кривая холостого хода — E_a.

Кривая E лежит ниже кривой E_a вследствие влияния реакции якоря.

Внешнюю характеристику мы можем получить путем построения из характеристики холостого хода.

На фиг. 204 показан способ построения.

При этом мы сделаем предположение, что реакция якоря точно изменяется прямо пропорционально току.

Строим характеристичный треугольник *1-2-3*, у которого сторона *1-2* равна величине реакции якоря, а сторона *2-3* — падению напряжения в якорной и последовательной обмотках; если вершина *1* этого треугольника будет лежать на кривой E_a, то вершина *3* будет лежать на кривой U; в этом можно убедиться на основании рассуждений, подобных изложенным выше в предыдущем параграфе.

Построив ряд характеристичных треугольников с размерами сторон, измененными в соответствии с величиной нагрузочного тока, и располагая эти треугольники так, что их вершины *1*, *1'*, *1''* и т. д. будут лежать на кривой E_a в соответственных точках, мы найдем, что точки *3*, *3'*, *3''* и т. д. будут лежать на искомой кривой U.

Вместо того чтобы строить для разных нагрузок характеристичные треугольники полностью, можно перемещать только вычисленную для разных сил токов гипотенузу *1-3* параллельно самой себе, как показано пунктиром на фиг. 204.

§ 93. Характеристические кривые шунтового генератора. a) Характеристика холостого хода. В шунтовых машинах характеристика холостого хода может быть экспериментально получена двумя способами.

При первом способе обмотке электромагнитов можно дать независимое возбуждение; схема соединений при этом получится согласно фиг. 194.

При втором способе обмотку возбуждения можно оставить приключенной шунтом к якорю машины и ток возбуждения изменять при помощи регулировочного реостата. При втором способе испытуемая машина в сущности не будет работать вхолостую, будучи нагружена током шунтовой обмотки.

Так как этот ток в общем очень невелик (составляет в среднем 2—3% от главного тока), то кривые холостого хода, снятые по тому и другому способу, практически почти не будут отличаться друг от друга.

b) Самовозбуждение шунтовой машины. Для того чтобы ответить на вопрос, до какой величины поднимается напряжение шунтовой машины, вращающейся вхолостую, необходимо знать, во-первых, как изменяется э. д. с. E_a машины в функции тока возбуждения i_n:

$$E_a = f\ (i_n), \tag{93,1}$$

и, во-вторых, необходимо знать, как изменяется напряжение на зажимах шунтовой обмотки U в функции i_n, т. е. необходимо знать функцию

$$U = f'\ (i_n). \tag{93,2}$$

Первая функция математически просто быть выражена не может; графически она дается характеристикой холостого хода.

Вторая функция при постоянной величине сопротивления обмотки возбуждения r_n принимает очень простой вид:

$$U = i_n \cdot r_n, \tag{93,3}$$

т. е. полученное нами уравнение (93,3) говорит, что напряжение на зажимах машины (оно же — напряжение на зажимах шунтовой обмотки) должно быть равно падению напряжения в шунте.

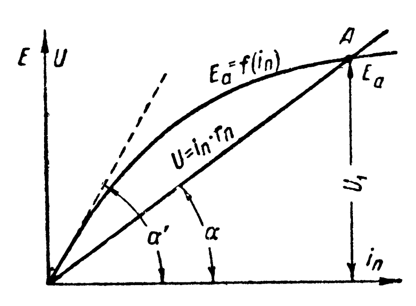
При холостом ходе мы имеем $E_a = U$; поэтому, приравнивая уравнение (93,1) и (93,3) друг к другу, получаем

$$i_n \cdot r_n = f(i_n). \tag{93,4}$$

Решая уравнение (93,4), можем найти неизвестную величину. Аналитически решить уравнение (93,4) не представляется возможным, так как математическое выражение $f(i_n)$ нам неизвестно.

Решить уравнение (93,4) можно графически следующим образом:

Строим на фиг. 205 уравнение $U = i_n \cdot r_n$, которое представляет собой прямую линию, наклоненную к оси абсцисс под углом $\alpha = \operatorname{arc\,tg} \frac{U}{i_n} = \operatorname{arc\,tg} r_n$. Уравнение $E_a = f(i_n)$ на фиг. 205 представлено в виде кривой характеристики холостого хода.



Фиг. 205. Графическое определение U_1 при самовозбуждении шунтового генератора.

Находя графически точку пересечения A характеристики с прямой (фиг. 205), мы тем самым совместно решаем уравнения (93,1) и (93,3) и находим то напряжение U_1, до которого возбудится вращающаяся вхолостую шунтовая машина.

Как показывает фиг. 205, с увеличением угла α точка A пересечения передвигается влево, т. е. при увеличении сопротивления шунтовой обмотки напряжение холостого хода машины понижается.

Если наклонная линия $U = i_n \cdot r_n$ примет положение касательной (пунктир на фиг. 205), то прямая перестанет пересекать характеристику, т. е. машина перестанет давать напряжение.

Отсюда видно, что для каждой машины существует такое критическое сопротивление шунта

$$r_n = \operatorname{tg} \alpha',$$

при котором машина уже не может возбудить себя.

c) Внешняя характеристика. Для экспериментального получения этой характеристики можно пользоваться схемой фиг. 206.

На фиг. 207 показана внешняя характеристика шунтовой машины II, полученная экспериментальным путем. На этой же фигуре показана внешняя характеристика для той же самой машины, но при независимом возбуждении полюсов I.

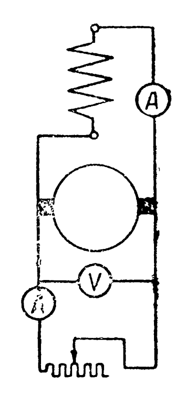
Сравнивая кривые I и II между собой, мы видим, что падение напряжения при тех же нагрузках в машине шунтового

возбуждения получается больше, чем в машине независимого возбуждения; причина этого заключается в том, что ток возбуждения i_n в машине шунтового возбуждения не остается постоянным, а падает с увеличением нагрузки.

При коротком замыкании шунтовой машины мы имеем $U=0$, а следовательно, и

$$i_n = \frac{U}{r_n} = 0,$$

т. е. при этих условиях машина совершенно размагничивается и не дает напряжения.

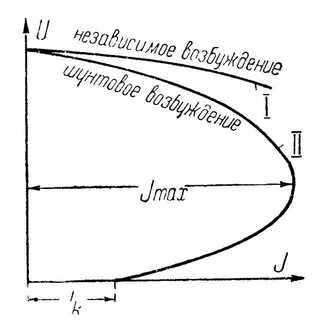


Фиг. 206. Схема шунтового генератора.

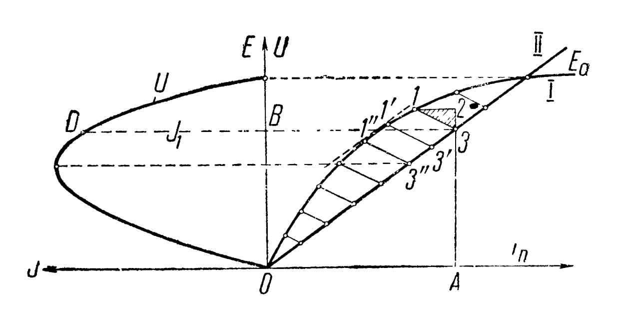
Как показывает фиг. 207, при коротком замыкании ток в обмотке якоря шунтовой машины в действительности не бывает равен нулю, а достигает некоторой величины I_k вследствие наличности остаточной магнитной индукции.

Из фиг. 207 также видно, что при уменьшении внешнего сопротивления ток машины сначала возрастает, затем, достигнув некоторой максимальной величины I_{max}, начинает при дальнейшем уменьшении внешнего сопротивления убывать; ток I_{max} есть тот максимальный ток, который вообще может дать шунтовая машина данной величины и конструкции; мы видим, что этот ток I_{max} больше тока короткого замыкания I_k.

Так же, как и для машины последовательного и независимого возбуждения, внешняя характеристика шунтовой машины может быть найдена на основании характеристики холостого хода.



Фиг. 207. Внешняя характеристика шунтового генератора (кривая I).



Фиг. 208. Графическое построение внешней характеристики шунтового генератора.

На фиг. 208 показан способ построения; на этой фигуре построены: характеристика холостого хода (кривая I) и зависимость между напряжением на зажимах шунтовой обмотки и током шунта $U = i_n \cdot r_n$ (прямая II).

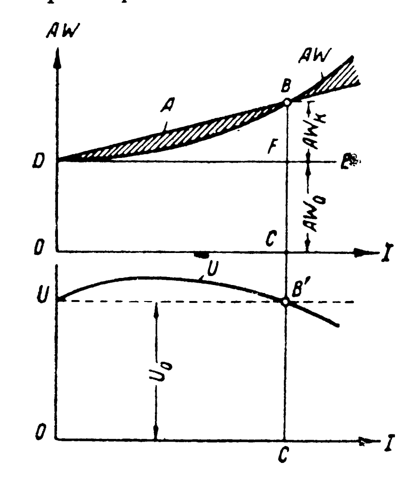
Строим для какого-нибудь тока I_1 характеристичный треугольник 1-2-3, где 1-2 — реакция якоря и 2-3 — падение напря-

жения в арматуре; этот треугольник располагаем так, чтобы он касался точкой *1* кривой холостого хода, а точкой *3* прямой *II*[1].

Тогда отрезок *А3* дает нам величину напряжения у зажимов машины при данном токе.

Затем проводим ряд прямых *1'-3'*, *1''-3''* и т. д., параллельных гипотенузе треугольника *1-3*; предполагая, что реакция якоря и падение напряжения в нем изменяются прямо пропорционально току машины, мы видим, что отрезки *1-3*, *1'-3'*, *1''-3''* и т. д. в некотором масштабе могут нам изображать нагрузочные токи машины.

Поэтому, проводя через точку *3* горизонталь и откладывая на ней от начальной ординаты отрезок *BD*, пропорциональный отрезку *1-3* и равный I_1, получаем одну из точек *D* внешней характеристики; таким же образом могут быть построены другие точки внешней характеристики. Так как при этом построении не принято во внимание влияние остаточной индукции в полюсах, то кривая *U* проходит через начало координат. Практическое значение имеет только верхняя часть характеристики, в которой обычно происходит нормальная работа генератора.



Фиг. 209. Нахождение числа витков последовательной обмотки компаундного генератора.

§. 94. Характеристики генератора смешанного возбуждения.

а) Определение числа витков обмотки последовательного возбуждения. В генераторе смешанного возбуждения благодаря наличности обмотки главного тока суммарные ампервитки возбуждения с увеличением нагрузки возрастают.

Число витков последовательной обмотки возбуждения мы можем подобрать таким образом, чтобы, во-первых была укомпенсирована реакция якоря и чтобы, во-вторых, э. д. с. машины с увеличением нагрузки увеличивалась пропорционально падению напряжения в арматуре.

В этом случае напряжение у зажимов машины будет приблизительно постоянным.

Для нахождения числа витков последовательной обмотки возбуждения поступаем следующим образом.

По способу, описанному раньше, находим регулировочную кривую, дающую зависимость между током нагрузки машины *I* и числом ампервитков возбуждения *AW* (или тока возбуждения).

[1] Характеристичный треугольник должен касаться прямой *II*, так как напряжение на зажимах (щетках якоря) должно быть равно напряжению на зажимах обмотки возбуждения $= i_n \cdot r_n$.

Проводим наклонную прямую A так (фиг. 209), чтобы она пересекла кривую AW в точке B, соответствующей нормальной нагрузке машины; проводим через точку B ординату BC и через точку D горизонталь DE; тогда отрезок BF дает нам в некотором масштабе величину добавочных ампервитков AW_k, которые должны быть созданы последовательной обмоткой возбуждения.

При этом построении мы предполагаем, что ампервитки шунтовой обмотки AW_0 при всех изменениях нагрузки остаются приблизительно постоянными, а изменяются только ампервитки последовательной обмотки AW_k[1].

Таким образом мы видим, что наклонная прямая A на фиг. 209 будет изображать нам изменение ампервитков последовательной обмотки, а прямая DE, параллельная оси абсцисс, будет изображать изменение ампервитков шунтовой обмотки в функции тока нагрузки I.

b) Внешняя характеристика. Если бы регулировочная кривая AW (фиг. 209, вверху) совпадала с прямой A, то внешняя характеристика компаундной машины представляла бы собой прямую, параллельную оси абсцисс.

Как, однако, видно из фиг. 209, кривая AW не совпадает с прямой, поэтому и внешняя характеристика представляет собой кривую линию (см. кривая U на фиг. 209, внизу).

При нагрузках машины, меньших OC, точки прямой A лежат выше соответственных точек кривой AW, т. е., другими словами, ампервитки возбуждения машины чересчур велики, и напряжение на зажимах машины U получается больше напряжения при холостом ходе U_0.

При нагрузке, равной OC, прямая A пересекается с кривой AW, и напряжение на зажимах $U = U_0$; при нагрузках больших, чем OC, прямая A протекает ниже, чем кривая AW, ампервитки возбуждения оказываются недостаточно большими, и напряжение машины U делается меньше, чем U_0.

ГЛАВА ДВЕНАДЦАТАЯ

ПАРАЛЛЕЛЬНАЯ РАБОТА ГЕНЕРАТОРОВ ПОСТОЯННОГО ТОКА

§ 95. Параллельная работа генераторов последовательного возбуждения. На фиг. 210 дана схема параллельного соединения двух сериесных генераторов *I* и *II*. Опыт показывает, что сериесные машины, соединенные по такой схеме, параллельно работать устойчиво не могут.

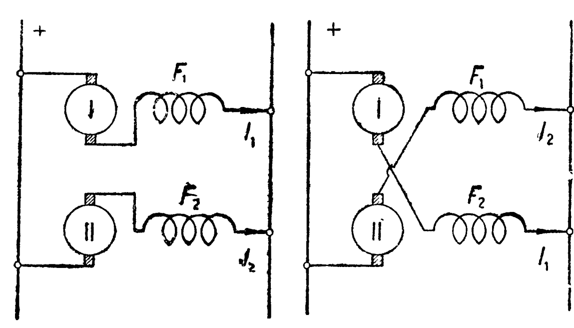
Причину этого можно объяснить следующим образом:

[1] Так как внешняя характеристика машины смешанного возбуждения не представляет собой прямой, параллельной оси абсцисс, то и ампервитки AW_0 при изменениях нагрузки на самом деле не остаются постоянными, а немного изменяются.

Предположим, что одна из двух машин, соединенных параллельно согласно фиг. 210, — машина *I* дает ток в сеть I_1, и машина *II* дает ток I_2. Допустим, что э. д. с. машины *I* почему-либо немного увеличилась (вследствие, например, случайного увеличения числа ее оборотов в минуту).

Вследствие этого увеличится ток I_1 этой машины, а вместе с тем ее магнитный поток машины и ее э. д. с.; от этого ток I_1 еще больше возрастет, что в свою очередь вызовет дальнейшее возрастание магнитного потока и связанное с этим возрастание э. д. с. и т. д.; в конце концов машина *I* воспримет на себя всю нагрузку, а остальные параллельно работающие машины соответственно разгрузятся.

Таким образом мы видим, что сериесные генераторы при схеме фиг. 210 не могут устойчиво работать параллельно.



Фиг. 210. Параллельное соединение сериесных машин.

Фиг. 211. Параллельное соединение сериесных машин (обмотки возбуждения перекрещены).

Устойчивая параллельная работа может быть, однако, осуществлена после некоторого видоизменения схемы фиг. 210. Это видоизменение заключается в перекрещивании обмоток возбуждения F_1 и F_2, как это показано на фиг 211.

При такой схеме параллельная работа машин *I* и *II* будет вполне устойчивой. В этом случае увеличение тока, например, машины *I*, вызовет соответственное увеличение э. д. с. машины *II* (ввиду того, что ток машины *I* питает обмотку возбуждения F_2 машины *II*), и нагрузка внешней цепи передается также и на машину *II*.

Эта схема с перекрещенными обмотками возбуждения иногда применяется при электрическом торможении трамвайных двигателей.

§ 96. Параллельная работа шунтовых генераторов. Регулирование нагрузки отдельных машин. На фиг. 212 изображена схема параллельной работы машин шунтового возбуждения.

Предположим, что у нас имеются две шунтовые машины *I* и *II*, работающие на сеть в параллельном соединении. Попытаемся ответить на вопрос, от каких обстоятельств будут зависеть величины токов I_1 и I_2, посылаемых этими машинами в сеть.

Для этой цели обратимся к внешним характеристикам обеих машин *I* и *II* (фиг. 213а).

Отметим на чертеже напряжение сети *U* (являющееся общим для обеих машин). Проведем на фиг. 213а параллель на расстоянии *U* от оси абсцисс и отметим точки пересечения *1* и *2* прямой

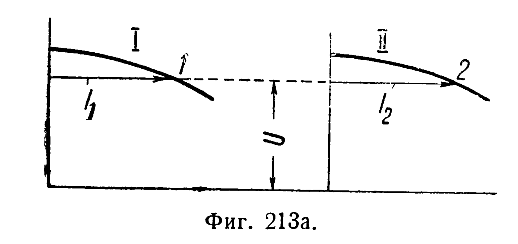
с характеристиками *I* и *II*; тогда расстояния точек *1* и *2* от осей ординат в некотором масштабе дадут нам соответствующие токи I_1 и I_2, которые будет посылать каждая машина в сеть.

Наиболее распространенный способ регулировки нагрузок отдельных машин, работающих параллельно на общую сеть, это — изменение тока возбуждения машин при помощи шунтового реостата.

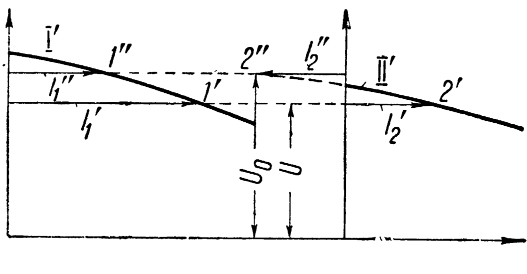
Попытаемся выяснить величины тока возбуждения в величине нагрузки отдельных машин.

Фиг. 212. Параллельное соединение генераторов шунтового возбуждения.

Для этой цепи предположим, например, что нам нужно нагрузить машину *I* и разгрузить машину *II*, работающую с *I* параллельно. Для этого попробуем увеличить несколько ток i_1 возбуждения машины *I* и немного ослабить ток возбуждения i_2 ма-



Фиг. 213a.



Фиг. 213b.

шины *II*; в результате у нас получатся вместо прежних характеристик новые кривые *I'* и *II'* (фиг. 213b).

Как видно на фиг. 213b, теперь (при новых токах возбуждения) характеристика *I'* первой машины расположена несколько выше прежней кривой *I* и характеристика *II'* второй машины расположена несколько ниже кривой *II* относительно оси абсцисс.

Повторяя то же построение, что и раньше, т. е., проводя горизонталь на расстоянии *U* от оси абсцисс и находя соответственные точки пересечения *1'* и *2'*, найдем, что теперь ток, посылаемый первой машиной, будет равен I_1' (вместо прежней I_1), и ток, посылаемый в сеть второй машиной, теперь станет I_2' (вместо I_2).

Мы видим, что та машина, ток возбуждения которой был увеличен, нагрузилась больше и машина с уменьшенным током возбуждения соответственно уменьшила свою нагрузку. Таким образом мы располагаем чрезвычайно простым и удобным средством для регулирования нагрузки отдельных машин, параллельно работающих на общую сеть: это — воздействие на ток возбуждения машины при помощи шунтовых реостатов.

Влияние выключения внешней нагрузки. Предположим, что во время параллельной работы машин внешняя сеть будет выключена (если, например, перегорит главный предохранитель или выключится автомат).

В этом случае ток в машинах будет равен нулю только в том случае, если к моменту выключения сети их э. д. с. были одинаковой величины.

В противном случае одна из машин пойдет двигателем, другая нагрузится генератором.

Сказанное поясняет фиг. 213b, где изображены характеристики двух машин; здесь характеристика I' первой машины (имеющей большее возбуждение) расположена несколько выше относительно оси абсцисс, чем характеристика II' второй машины (слабее возбужденной).

При уменьшении до нуля внешней нагрузки напряжение возрастает до величины U_0. Проводя, как и раньше, горизонталь на расстоянии U_0 от оси абсцисс, находим точки пересечения $1''$ и $2''$ с кривыми I' и II'. Мы видим, что теперь ток I_2'' второй машины имеет отрицательное значение: это значит, что машина I теперь работает в качестве генератора, посылая ток $I_1''=I_2''$ во вторую машину и приводя ее во вращение в качестве двигателя.

Для того чтобы при холостом ходе разгрузить машины I и II от тока, бесполезно нагревающего их обмотки, необходимо соответственным образом усилить возбуждение машины II или ослабить возбуждение машины I.

§ 97. Параллельная работа машин смешанного возбуждения. При параллельной работе машин смешанного возбуждения приходится считаться с теми же явлениями, затрудняющими параллельную работу, что и в случае сериесных машин. Повторяя те же рассуждения, что и в случае сериесных машин, мы можем убедиться, что два или несколько генераторов смешанного возбуждения, соединенных между собой параллельно обычным образом, работают неустойчиво.

В дополнение следует еще отметить другое обстоятельство, указывающее на затруднения, могущие встретиться при параллельной работе компаундных машин.

Если случайно одна из компаундных машин совершенно разгрузится и перейдет на моторную работу, направление тока в ее обмотках якоря и сериесных катушках возбуждения изменится на обратное; в результате этого сериесные катушки начнут ослаблять поток возбуждения, что может вызвать разнос машины при моторном режиме.

Как бороться с этими затруднениями?

Есть средство, которое может сделать работу этих машин устойчивой; оно заключается в том, что все одноименные щетки динамомашин (например, „минусовые") соединяются между собой накоротко. На фиг. 214 изображена такая схема параллельного соединения двух машин смешанного возбуждения, где *1-2* есть уравнительный провод, соединяющий между собой все одноименные щетки.

При такой схеме, в случае возрастания тока I_1 первой машины, соответственным образом возрастает не только ток I_1', текущий в сериесной обмотке H_1 машины *I*, но также возрастает и ток I_2', текущий в сериесной обмотке H_2 машины *II*, так как обмотки H_1 и H_2 соединены друг с другом посредством уравнительного провода параллельно.

Сопротивление этого уравнительного провода должно быть возможно малым.

Если параллельно работают совершенно одинаковые, одной и той же номинальной мощности машины *I* и *II*, нагрузка между ними при одинаковом токе возбуждения двух этих машин будет делиться поровну.

Если машины *I* и *II* — неодинаковой мощности, то нагрузка между этими машинами должна распределяться пропорционально их номинальным мощностям.

Фиг. 214. Параллельное соединение генераторов смешанного возбуждения. *1-2* — уравнительный провод.

Для достижения этого сопротивления сериесных катушек H_1 и H_2 должны быть обратно пропорциональны номинальным силам токов генераторов.

Часто подбор этих сопротивлений производится на месте установки генераторов опытным путем: путем включения в цепь сериесных катушек возбуждения добавочных небольших сопротивлений ρ_1 и ρ_2 (фиг. 214а).

На фиг. 214а дана подробная схема соединения генераторов смешанного возбуждения.

Как видно из этой фигуры, каждый из генераторов может быть включен на параллельную работу при помощи трехфазных (вернее, тройных) рубильников, у которых два левых „ножа" приключают к шинам напряжения якорь машины, а правые „ножи" приключают уравнительные шины *O—O*.

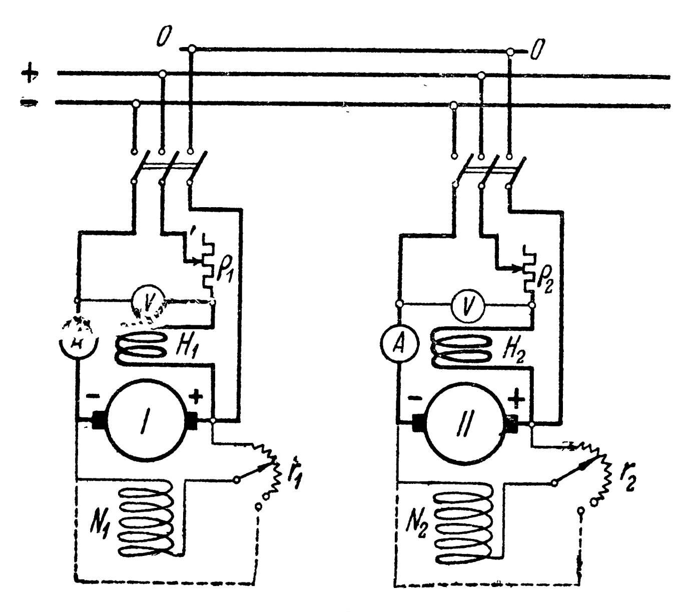
Реостаты ρ_1 и ρ_2, как было сказано выше, служат для регулировки тока в сериесных катушках возбуждения H_1 и H_2, причем их сопротивление на месте установки устанавливается раз навсегда.

Параллельная работа машины шунтового возбуждения с машиной смешанного возбуждения. Случай параллельной работы компаундной и шунтовой машин встречается довольно редко на практике.

На практике такой случай может иногда представиться, если обе шунтовые машины, параллельно работающие на станции, заметным образом отличаются друг от друга по своим характеристикам, благодаря чему бывает трудно достичь правильного распределения нагрузок между ними.

В этом случае путем добавления на полюсах машины нескольких витков сериесной обмотки можно изменить очертания внешней характеристики той или другой машины.

Такого же результата в смысле изменения очертаний внеш-



Фиг. 214а.

ней характеристики можно достичь иногда путем смещения на небольшой угол щеток на коллекторе с нейтральной зоны, благодаря чему изменяется величина реакции якоря, влияющая на форму кривой нагрузочной характеристики.

Однако при этом часто возникают затруднения, связанные с ухудшением условий коммутации.

Число витков вышеуказанной добавочной сериесной обмотки возбуждения не должно переходить некоторого предела, иначе при этой схеме возможно появление при некоторых условиях незатухающих колебаний токов I_1 и I_2 параллельно работающих машин.

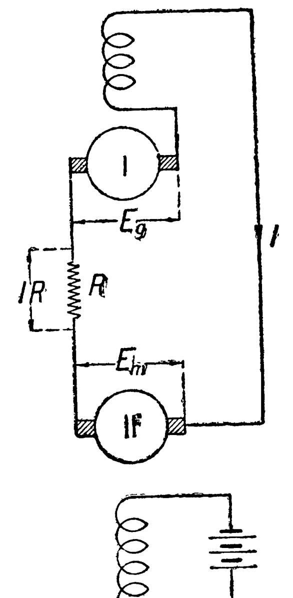
Наиболее резко это явление „качаний“ можно наблюдать в схеме, описанной в следующем параграфе.

§ 98. Явление „качаний“, наблюдаемое в цепи генератора последовательного возбуждения, питающего двигатель независимого возбуждения. На фиг. 215 изображена цепь, состоя-

щая из генератора последовательного возбуждения *I*, питающего двигатель независимого возбуждения *II*.

Как показывает опыт, устойчивая работа таких машин невозможна; схема фиг. 215 обладает любопытным свойством: двигатель *II*, питаемый от генератора *I*, будет периодически менять свою скорость, вращаясь то в одну, то в другую сторону. Кривые изменения числа оборотов n и тока I, которые при этом получаются, изображены на фиг. 216. Объяснить причину возникновения колебаний, иллюстрирующих фиг. 216, можно следующим образом:

Обозначим э. д. с. сериесной машины *I* (работающей генератором) через E_g и э. д. с. машины *II* через E_m (при работе машины *II* двигателем E_m будет не что иное, как противо-э. д. с.).



Фиг. 215. Питание двигателя с независимым возбуждением *II* сериесным генератором *I*.

Для замкнутой цепи, состоящей из двух машин, можно написать

$$E_g = E_m + IR,$$

где R—омическое сопротивление всей цепи.[1]

Построим характеристику, дающую зависимость между э. д. с. генератора E_g и его током I (фиг. 217).

Если бы якорь двигателя *II* был неподвижен и генератор *I* работал бы только на омическое сопротивление R, то, проводя прямую, наклонную к оси абсцисс под углом

$$\alpha = \text{arc tg}\,\frac{E_g}{I},$$

мы нашли бы ту э. д. с. E_g, до которой возбудился бы генератор *I*.

Фиг. 216.

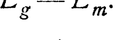
Если же якорь двигателя *II* начнет вращаться, то произойдет следующее:

Ток *I* начнет падать, вследствие чего поток возбуждения генератора *I* начнет убывать, и поэтому будет падать также э. д. с. E_g.

Что будет при этом происходить с двигателем *II*?

Его якорь будет постепенно раскручиваться, что вызовет соответственное увеличение противо-э. д. с. E_m.

Таким образом в этот момент времени будет происходить уменьшение э. д. с. E_g и увеличение э. д. с. E_m.



$$E_g - E_m.$$

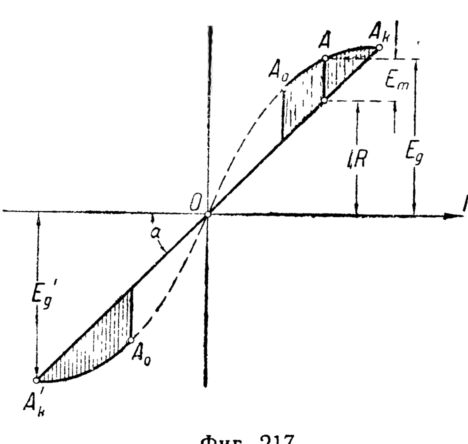
[1] На фиг. 215 сопротивление R изображено для наглядности в виде реостата.

Разность э. д. с. будет итти на покрытие падения напряжения IR:

$$E_g - E_m = IR.$$

При постепенном раскручивании двигателя *II* точка *A* (фиг. 217) перемещается на характеристике по направлению к началу координат.

Начиная с точки A_0 диаграммы, противо-э. д. с. двигателя E_m должна была бы начать убывать для того, чтобы явление происходило устойчиво. Однако этого в действительности не случится благодаря тому, что развернувшийся якорь двигателя *II* будет и дальше вращаться по инерции; следствием этого будет то, что, начиная с этого момента, противо-э. д. с. E_m двигателя станет больше э. д. с. генератора E_g.



Фиг. 217.

В результате ток *I* изменит свое направление на обратное, и **г е н е р а т о р** *I* **п е р е м а г н и т и т с я**, возбудившись до напряжения E_g противоположного знака. Вследствие этого двигатель *II* резко затормозится и начнет затем вращаться в обратную сторону. Далее явление пойдет тем же порядком, что и раньше, но при вращении двигателя *II* в обратную сторону.

Таким образом якорь двигателя *II* начнет совершать постоянные колебания, характер которых иллюстрирует фиг. 216.

ГЛАВА ТРИНАДЦАТАЯ

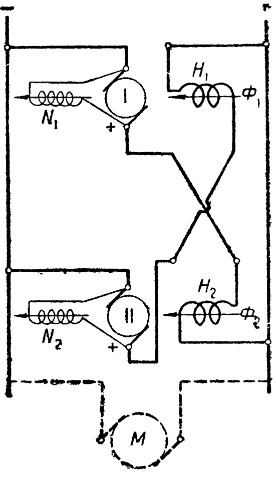
ПАРАЛЛЕЛЬНАЯ РАБОТА МАШИН БОЛЬШОЙ МОЩНОСТИ

§ 99. Средства для увеличения равномерности распределения нагрузки между параллельно работающими генераторами. При больших мощностях параллельно работающих генераторов бывает иногда затруднительно добиться вполне равномерного распределения нагрузки между отдельными генераторами. Особенно большие затруднения возникают при толчкообразном характере нагрузки генераторов, например, при питании больших двигателей, приводящих в движение реверсивные прокатные станы. [1]

[1] Максимальная мощность таких двигателей может достигать 10 000—15 000—20 000 *л. с.* и выше.

В этом случае большую пользу может оказать применение генераторов смешанного возбуждения с перекрещенными сериесными обмотками. Такая схема изображена на фиг. 218. Здесь показаны два генератора *I* и *II*, возбуждение которых состоит из шунтовых обмоток N_1 и N_2 и последовательных H_1 и H_2. Как видно из этой фигуры, последовательные обмотки перекрещены: обмотка H_2 генератора *II* питается током якоря генератора *I*, и в свою очередь обмотка H_1 генератора *I* получает питание от якоря *II*. Благодаря такой схеме осуществляется взаимный контроль работы генераторов, и вследствие этого нагрузка между машинами *I* и *II* при всех условиях работы делится приблизительно поровну.

Действительно, предположим, что нагрузка генератора *I* по каким-нибудь случайным причинам стала больше, чем нагрузка генератора *II*; тогда произойдет следующее: увеличившийся ток генератора *I* усилит поле Φ_2 обмотки H_2 генератора *II*, вследствие чего его суммарный магнитный поток, создаваемый сообща обмотками H_2 и N_2, немедленно возрастает, и в результате этого произойдет увеличение э. д. с. генератора *II* и соответственное увеличение его нагрузки, таким образом генератор *II* воспримет на себя часть нагрузки генератора *I*. Точно таким же образом будет протекать явление при случайной перегрузке генератора *II*, причем часть этой нагрузки воспримет на себя генератор *I*.



Фиг. 218. Параллельное соединение генераторов с перекрещенными компаундными обмотками.

Описанная здесь схема фиг. 218 требует генераторов смешанного возбуждения, благодаря чему напряжение на шинах будет при этой схеме увеличиваться при возрастании внешней нагрузки.

Если такое возрастание линейного напряжения по каким-либо причинам является нежелательным, можно так видоизменить схему фиг. 218, что машины *I* и *II* потеряют в значительной мере свой характер генераторов смешанного возбуждения.

Новая видоизмененная схема изображена на фиг. 219.[1] Последняя схема от предыдущей отличается тем, что в новой схеме последовательная обмотка главных полюсов обеих машин разбита на две части; таким образом машина *I* кроме шунтовой обмотки N_1 имеет две последовательных обмотки H_1 и H_1', а машина *II* имеет обмотки N_2, H_2 и H_2'.

Обмотка H_1, питаемая током генератора *I*, создает поток Φ_1; обмотка H_1', питаемая током генератора *II*, создает поток Φ_1',

---

[1] См. The Electric Journal, June 1926. „Reversing Mill Driving Equipments" H E. Stokes.

направленный противоположно потоку Φ_1. Точно так же обмотки H_2 и H_2' генератора *II* создают взаимно компенсирующие друг друга потоки Φ_2 и Φ_2'.

Фиг. 219. Параллельное соединение генераторов большой мощности.

Действие этой схемы заключается в следующем:

Если нагрузка одного из генераторов, например, генератора *I*, станет больше, чем генератора *II*, то вышеупомянутая взаимная компенсация потоков нарушится, а именно: возрастут потоки катушек H_1 и H_2', благодаря чему результирующий поток генератора *I* станет меньше и результирующий поток генератора *II* соответственно увеличится; вследствие этого часть избытка нагрузки с генератора *I* перейдет на генератор *II*.

Таким же образом можно убедиться, что при случайной перегрузке генератора *II* часть избытка нагрузки воспримет на себя генератор *I*.

Благодаря диференциальному включению обмоток H, H_1' и H_2, H_2' генераторы *I* и *II* (фиг. 219) имеют в отличие от схемы фиг. 218 характеристику, близкую к шунтовой.

ГЛАВА ЧЕТЫРНАДЦАТАЯ

БУФЕРНЫЕ МАШИНЫ

§ 100. Работа аккумуляторной батареи в качестве „буфера“. На некоторых центральных станциях, обслуживающих сети с сильно колеблющейся нагрузкой (например, трамвайные сети), часто устанавливается аккумуляторная батарея *B* (фиг. 220), которая работает параллельно с генератором *G* станции и служит „буфером“, воспринимая на себя все толчки тока сети и способствуя тому, что генераторы станции работают при более постоянной нагрузке.

Роль аккумуляторной батареи, работающей в качестве буфера, освещают фиг. 220, 221 и 222.

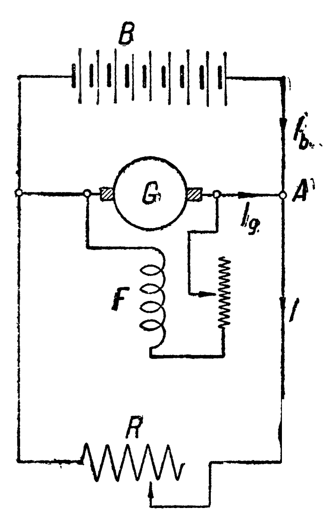
На фиг. 221 изображена примерная кривая изменения тока нагрузки центральной станции.

Из этой кривой видно, что при колебании внешнего (суммарного) тока в пределах $I_{max} - I_{min}$ ток генератора колеблется в пределах $I_g'' - I_g'$.

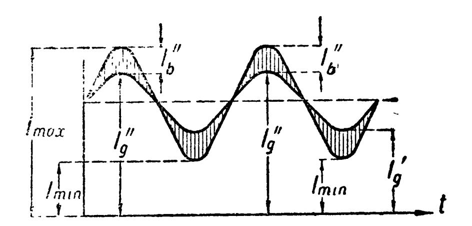
Если емкость батареи будет больше, то „пики нагрузки“ в большей мере, чем прежде, будут покрываться аккумулятор-

ной батареей и колебания тока генератора $I_g''-I_g'$ сделаются меньше, как это показано на фиг. 222.

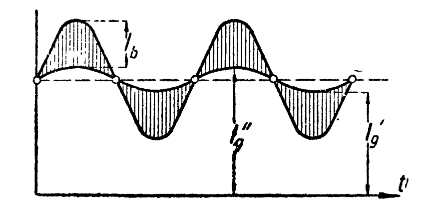
Таким образом кривая фиг. 222 является более благоприятной в смысле сохранения постоянства нагрузки работающего на станции генератора, чем кривая фиг. 221. Для получения, однако, работы, характеризующейся кривой фиг. 222, требуется дорогостоящая аккумуляторная батарея большей емкости.



Фиг. 220. Параллельное соединение шунтового генератора G и батареи B.



Фиг. 221. Колебания тока генератора $I_g''-I_g'$ при малой емкости буфера.



Фиг. 222. Колебания тока генератора $I_g''-I_g'$ при большой емкости буфера.

Можно, однако, и при аккумуляторной батарее относительно малой емкости получить хорошее выравнивание нагрузки, как на фиг. 222, усложнив несколько схему фиг. 220, как об этом говорится в следующем параграфе.

§ 101. Буферная машина Гайфильда. Как видно из предыдущего параграфа, главной причиной того обстоятельства, что аккумуляторная батарея относительно малой емкости принимает на себя в слабой мере толчки нагрузки (благодаря чему все эти толчки приходится воспринимать на себя генератору), является неподходящая форма внешней характеристики такой батареи. Для того чтобы сделать такую батарею подходящей для параллельной работы с генератором, необходимо изменить как-нибудь искусственно внешнюю характеристику батареи. Этого можно достичь, как показано ниже, соединяя последовательно аккумуляторную батарею с особыми вольтодобавочными машинами, или, как их еще называют, „бустерами“.

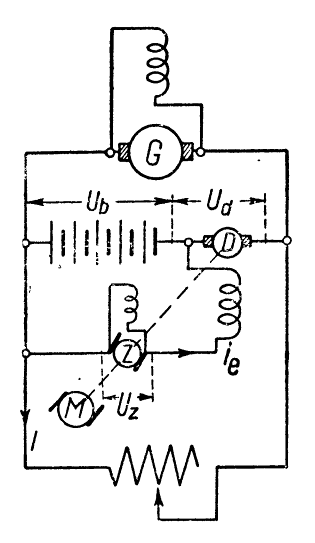
Задачей таких вольтодобавочных машин является исправление внешней характеристики аккумуляторной батареи применительно к каждому данному случаю.

Одна из первых попыток в этом роде была сделана Гайфильдом.

На фиг. 223 показана схема Гайфильда. Как видно на фиг. 223, последовательно с буферной батареей включена вольтодобавочная машина или бустер D. Последний имеет свой возбудитель Z, сидящий на общем валу; на том же валу сидит двигатель M, который вращает машины Z и D.

Ток возбуждения i_e бустера D вызывается разностью напряжений батареи и возбудителя. Таким образом ток, текущий в обмотке возбуждения бустера, будет

$$i_e = \frac{U_z - U_b}{R},$$



Фиг. 223. Буферная машина Гайфильда.

где U_z — напряжение возбудителя, U_b — напряжение батареи и R — сопротивление обмотки возбуждения бустера.

Вся система отрегулирована так, что при некоторой средней (нормальной) нагрузке сети напряжение на коллекторе бустера

$$U_d = 0.$$

Для того чтобы это было возможно, необходимо, чтобы при этой средней нагрузке $U_z = U_b$ и, следовательно, $i_e = 0$.

Предположим теперь, что ток во внешней сети уменьшается и стал ниже нормального ($I < I_н$). Тогда напряжение батареи U_b возрастет, в результате чего получится $U_b > U_z$; вследствие этого при таких условиях ток возбуждения

$$i_e = \frac{U_z - U_b}{R}$$

станет отрицательным, т. е. будет направлен в сторону, обратную по сравнению с предшествующим моментом.

Таким образом н а п р я ж е н и е U_d н а щ е т к а х б у с т е р а и з м е н и т с в о й з н а к и будет вычитаться из напряжения батареи, так что результирующее напряжение будет равно

$$U_b - U_d.$$

Если ток во внешней сети увеличится и станет больше нормального ($I > I_н$), напряжение батареи U_b уменьшится и станет меньше напряжения возбудителя U_z.

В результате ток возбуждения бустера

$$i_e = \frac{U_z - U_b}{R}$$

изменит по сравнению с предыдущим свое направление, и н а п р я ж е н и е н а к о л л е к т о р е б у с т е р а теперь станет вместо

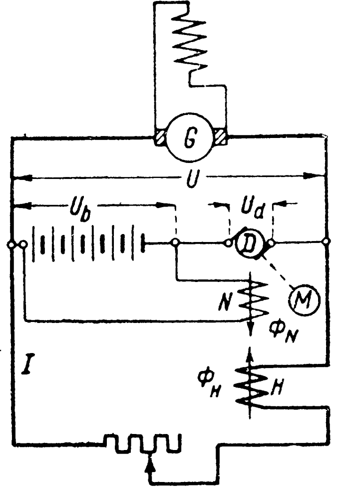
отрицательного **положительным**, при этих условиях результирующее напряжение будет

$$U = U_b + U_d.$$

Отсюда видно, что бустер автоматически будет регулировать величину результирующего напряжения U в зависимости от нагрузки.

§ 102. Буферная машина Пирани (Pirani).

Схема Гайфильда обладает недостатком, который заключается в некоторой ее сложности. Пирани упростил схему Гайфильда, соединив машину Z и машину D (фиг. 220) в одну, как это показано на фиг. 224.



Фиг. 224. Буферная машина Пирани.

Таким образом вместо двух машин (Z и D) предыдущей схемы в своей схеме Пирани применяет всего-навсего одну вольтодобавочную машину D со смешанным возбуждением (фиг. 224).

Шунтовая обмотка возбуждения N этой машины приключена к батарее, другая (сериесная) обмотка H обтекается током сети и включена обратно обмотке N, так что потоки, создаваемые обмотками N и H, **вычитаются** друг из друга.

Ввиду этого результирующий поток вольтодобавочной машины будет

$$\Phi = \Phi_N - \Phi_H.$$

Размеры обмоток N и H подбираются так, чтобы при некоторой средней (нормальной) величине тока во внешней цепи, $I = I_н$, потоки Φ_N и Φ_H были бы равны друг другу:

$$\Phi_N = \Phi_H$$

и, следовательно,

$$\Phi = 0;$$

ясно, что при этих условиях напряжение U_d на коллекторе бустера тоже должно быть равно нулю.

При увеличении тока I выше нормального ($I > I_н$) будет пересиливать сериесная обмотка, благодаря чему на коллекторе бустера появится напряжение U_d, которое **будет складываться** с напряжением батареи.

Таким образом результирующее напряжение при этих условиях будет

$$U = U_b + U_d.$$

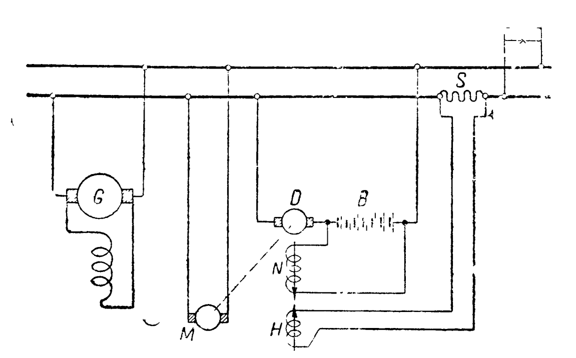
Когда же ток в сети I уменьшится и станет меньше нормального ($I < I_н$), будет перевешивать шунтовая обмотка N бустера, благодаря чему результирующий поток изменит свое направле-

ние и напряжение бустера изменит свой знак; при этих условиях результирующее напряжение будет равно

$$U = U_b - U_d.$$

Напряжение бустера обычно бывает небольшое (около 7—10%) от напряжения сети). Мощность агрегата составляет обычно 5—10% от мощности главной машины.

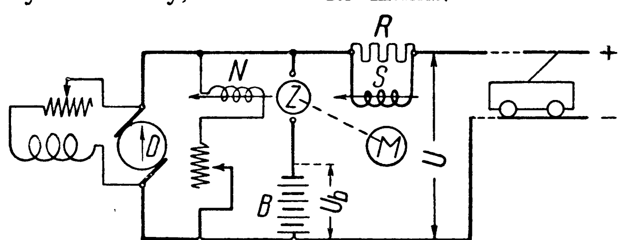
Иногда на практике схема Пирани видоизменяется так, как это показано на фиг. 225. Эта схема отличается от предыдущей тем, что обмотка возбуждения *H* здесь шунтирована сопротивлением *S* и обтекается ответвленным током.



Фиг. 225. Буферная машина Пирани.

M на схеме означает двигатель, который вращает бустер *D*.

§ 103. Буферная машина проф. Сагулка. Описанная выше схема соединения аккумуляторной батареи с вольтодобавочной машиной Пирани может быть упрощена таким образом, что двигатель, вращающий вольтодобавочную машину, явится излишним.



Фиг. 226. Буферная машина проф. Сагулки.

Такое упрощение было предложено проф. Сагулкой (Sahulka).[1] Новая схема изображена на фиг. 226.

Здесь означают:

D — главная динамомашина;

B — аккумуляторная батарея;

Z — якорь вольтодобавочной машины;

N — обмотка возбуждения вольтодобавочной машины, приключенная через регулирующий реостат к зажимам главной динамомашины;

S — сериесная обмотка возбуждения, шунтированная сопротивлением *R* и обтекаемая током, пропорциональным току внешней цепи;

M — маховик, сидящий на одном валу с *Z*.

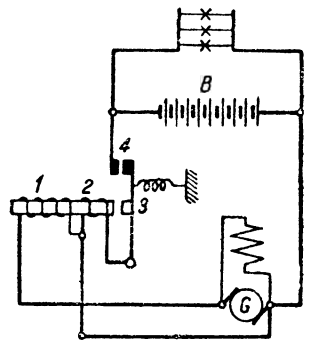
[1] См. „ETZ“ № 18, 1923, стр. 411.

Как видно из фиг. 225, обмотки возбуждения N и S, сидящие на общих магнитных сердечниках вольтодобавочной машины, действуют в одну и ту же сторону.

Машина Z может работать как двигатель или как генератор. При малой нагрузке сети машина Z работает как двигатель, вращая свой маховик.

При резком увеличении нагрузки в сети магнитный поток машины Z под воздействием сериесной обмотки возбуждения S увеличивается, противо-э. д. с. машины Z возрастает и делается больше напряжения, приложенного к щеткам ее якоря и равного разности напряжения сети и напряжения батареи $U - U_b$.

В этот момент машина Z работает как вольтодобавочный генератор, посылая электрическую энергию в сеть и расходуя предварительно запасенную кинетическую энергию маховика.



Фиг. 227. Параллельная работа генератора G с аккумуляторной батареей B.

При уменьшении нагрузки в сети ток в катушке S вольтодобавочной машины уменьшается, в связи с этим уменьшается суммарный магнитный поток, и э. д. с. якоря делается меньше приложенного к его щеткам напряжения $U - U_b$; в результате машина Z начинает работать как двигатель и, увеличивая свою скорость, начинает запасать энергию в маховике M (фиг. 227).

Таким образом при резких изменениях нагрузки в сети добавочная машина Z работает то как двигатель (запасая энергию в маховике), то как генератор (расходуя энергию маховика).

§ 104. Предохранение аккумуляторной батареи и динамомашины, работающих параллельно. При параллельной работе аккумуляторной батареи и динамомашины и при случайном уменьшении э. д. с. динамомашины ниже известного предела последняя будет работать в качестве двигателя, получая электрическую энергию от батареи. Такая работа вредно отражается на аккумуляторной батарее, так как при этом последняя перегружается и подвергается быстрой разрядке.

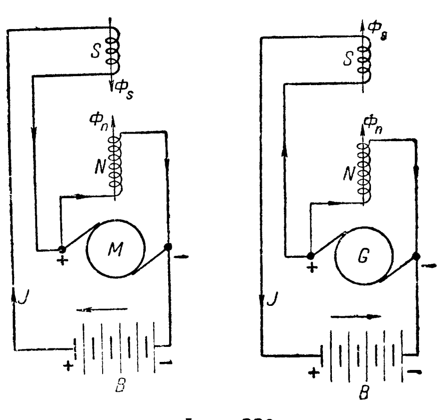
Можно обезопасить батарею от такого положения, применяя особый автоматический выключатель, основные черты которого поясняет фиг. 227.

На этой фигуре изображена аккумуляторная батарея B, соединенная параллельно с динамомашиной G посредством автоматического выключателя. Последний, как видно из фиг. 227, имеет железный сердечник, на который намотаны две катушки 1 и 2. Катушка 1, состоящая из большого числа витков тонкой проволоки, приключена к концам генератора G; катушка 2, состоящая из относительно небольшого числа витков толстой проволоки, обтекается главным током.

Направление витков катушек *1* и *2* таково, что при нормальной работе, когда машина *G* работает в качестве генератора, потоки, создаваемые катушками *1* и *2*, складываются; при этих условиях якорь *3* автомата находится в притянутом к сердечнику электромагнита состоянии.

При случайном понижении э. д. с. машины *G* последняя начинает работать как двигатель, потребляя электрическую энергию от батареи *B*, вследствие чего меняется направление тока в катушке *2*, и магнитный поток сердечника падает до нуля; благодаря этому рычаг, на котором сидит якорь *3*, оттягивается пружиной вправо, вследствие чего контакты *4* размыкаются и цепь генератора выключается.

§ 105. Затруднения, возникающие при работе компаундного генератора параллельно с аккумуляторной батареей. Как известно, причиной того обстоятельства, что аккумуляторная батарея относительно малой емкости принимает на себя в слабой мере толчки нагрузки, является неподходящая форма кривой внешней характеристики такой батареи.



Фиг. 228.

Для того чтобы заставить батарею принимать на себя толчки нагрузки, были предложены схемы с вольтодобавочными машинами (схемы Гайфильда, Пирани и др.). Этой же цели можно было бы попытаться добиться другим путем: подгоняя внешнюю характеристику генератора таким образом, чтобы при изменении нагрузки внешней цепи падение напряжения в генераторе получалось достаточно большим, что могло бы понудить параллельно присоединенную батарею принимать на себя толчки нагрузки.

Наиболее подходящей машиной для такой совместной работы с батареей на первый взгляд мог бы показаться генератор постоянного тока смешанного возбуждения.

Однако такой компаундный генератор не может вполне устойчиво работать параллельно с аккумуляторной батареей.

Причину этого поясняет фиг. 228, на которой изображен генератор *G* смешанного возбуждения, работающий параллельно с аккумуляторной батареей *B*.

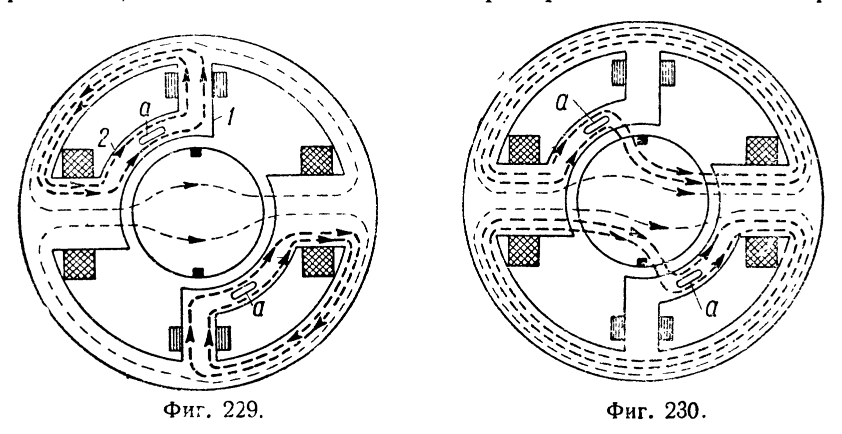
Как видно из фиг. 228, в случае з а р я д к и батареи (см. левый чертеж) сериесная обмотка *S* возбуждения создает магнитный поток Φ_S, направленный в ту же сторону, что и поток Φ_N, вызываемый шунтовой обмоткой *N*.

Если напряжение на клеммах машины почему-либо уменьшится настолько, что э. д. с. батареи *B* станет больше э. д. с.

машины, то направление тока I изменится и машина начнет работать двигателем (см. правый чертеж фиг. 228). При этих условиях направление потока Φ_S, создаваемого сериесной обмоткой, изменится на обратное: поток Φ_S будет теперь направлен противоположно потоку Φ_N, т. е. теперь обмотка S будет действовать размагничивающим образом, что может вызвать разнос машины, работающей в этот момент двигателем.

Генератор с „полюсами утечки". Инж. Е. Смит[1] (Smith) предложил такую конструкцию генератора смешанного возбуждения, при которой возможна параллельная работа последнего с аккумуляторной батареей.

Как видно из фиг. 229 и 230, на которых изображен генератор Смита, особенностью этого генератора является своеобраз-



Фиг. 229. Фиг. 230.

ное размещение шунтовой и сериесной обмоток: сериесная обмотка здесь расположена не на главных полюсах, как обычно, но на других полюсах — так называемых „полюсах рассеяния". Эти полюса рассеяния *1* расположены в нейтральной зоне и магнитно соединены с главными полюсами при помощи „магнитного моста" *2*. Как видно из чертежей, магнитный мост *2* увеличивает магнитную утечку главных полюсов, давая возможность части магнитного потока, создаваемого главными полюсами, замыкаться помимо якоря.

На „полюсах утечки" сидит обмотка возбуждения, обтекаемая главным током. Эта обмотка обтекается током такого направления, что она стремится поток утечки направить в железо якоря. Таким образом здесь при возрастании нагрузки машины поток утечки будет убывать и полезный магнитный поток якоря возрастать.

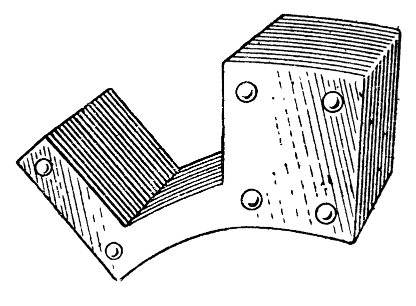
Сказанное иллюстрируют фиг. 229 и 230.

На фиг. 229 показано потокораспределение в случае холостого хода; здесь ток в катушках „полюсов утечки" невелик,

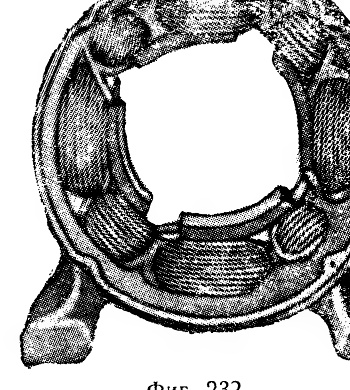
[1] См. „Journal of the Am. Inst. E. E." № 1, 1929.

противодействующее влияние полюсов утечки невелико, а поток рассеяния, замыкающийся через мост *2*, велик.

На фиг. 230 показана картина распределения потока при нагрузке машины; в этом случае обмотка „полюсов утечки", обтекаемая большим током, будет противодействовать потоку утечки и заставит его войти в железо якоря. как показано на



Фиг. 231.



Фиг. 232.

фиг. 230, в результате чего величина потока в якоре возрастает.

Машина, изображенная на фиг. 229, может быть без всяких опасений переключена на работу двигателем, так как большого ослабления потока возбуждения до опасных пределов в этом случае произойти не может благодаря большому магнитному насыщению „магнитного моста" (вследствие наличности прорезов *a*).

Действительно, при работе машины двигателем направление тока в обмотке „полюсов утечки" изменится на обратное, что заставит весь магнитный поток утечки, минуя якорь, замкнуться через „магнитный мост", как показано на фиг. 230, вследствие чего магнитный поток, проходящий в якорь, уменьшится на величину „потока утечки".

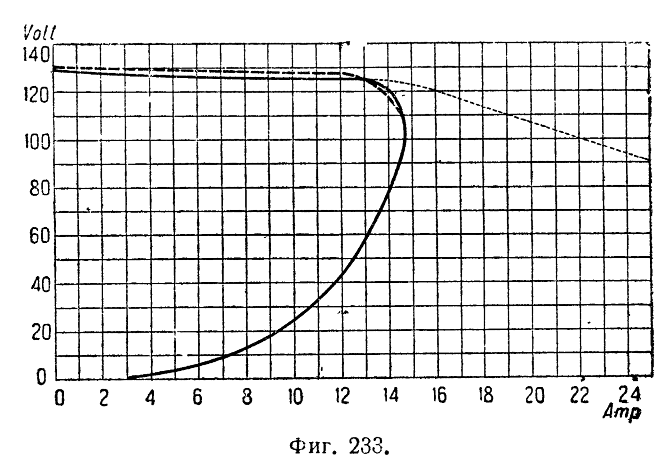
Благодаря большому магнитному насыщению „магнитного моста", однако, даже очень значительное возрастание величины главного тока, обтекающего катушки „полюсов утечки", не может в сильной степени отразиться на величине всего потока возбуждения.

Таким образом принципиальная разница между системой описанной здесь машины и обычной машиной заключается в том, что здесь сериесная обмотка, сидящая на „полюсах утечки", сцеплена только с частью магнитного потока машины, в то время как в обычных конструкциях сериесная обмотка, сидящая на главных полюсах, сцеплена со всем магнитным потоком возбуждения.

Благодаря такому расположению сериесной обмотки исключается возможность „разноса" при работе машины двигателем

вследствие того, что здесь магнитный поток машины не может быть сериесной обмоткой ослаблен до опасно малой величины.

На фиг. 231 показаны главный полюс машины, полюс утечки и магнитный мост, выполненные из железных листов и составляющие одно конструктивное целое. На фиг. 231 не видны прорезы *2*, так как они закрыты крайними листами, не имеющими этих прорезов. На фиг. 232 показан общий вид описанной здесь машины.



Фиг. 233.

На фиг. 233 приведена внешняя характеристика машины с „полюсами рассеяния". Пунктирной кривой обозначена характеристика, полученная при независимом возбуждении.

ГЛАВА ПЯТНАДЦАТАЯ

МАШИНЫ ДЛЯ ПИТАНИЯ ТРЕХПРОВОДНЫХ СЕТЕЙ

А. ТРЕХПРОВОДНАЯ СЕТЬ

Трехпроводная сеть, предложенная в 1882 г. Гопкинсоном, как известно, представляет собой комбинацию параллельного и последовательного соединения потребителей электрической энергии; она позволяет, оставляя то же напряжение на зажимах потребителей (например, ламп накаливания), напряжение распределительной сети удвоить.

На фиг. 234 показана трехпроводная сеть, питаемая динамомашиной.

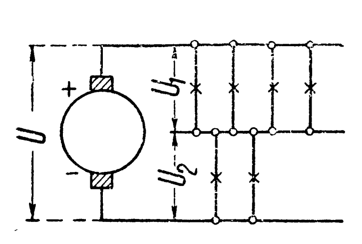
В таком виде, как показано на фиг. 234, трехпроводная сеть удовлетворительно работать не может, так как величина напряжений U_1 и U_2 будет все время меняться при изменении количества включенных в каждую половину сети ламп.

Действительно, предположим, что в нижней половине ламп меньше, чем в верхней; тогда вследствие большого сопротивле-

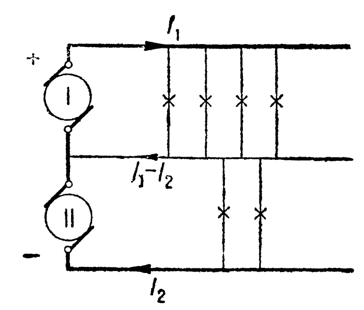
ния всей нижней половины сети по сравнению с сопротивлением верхней половины напряжение U_2 будет больше, чем U_1 (фиг. 234).

Таким образом лампы нижней половины окажутся под повышенным напряжением и могут перегореть.

Поэтому схема фиг. 234 нуждается в усовершенствовании. Можно, например, вместо одного генератора, как в предыдущем случае, соединить последовательно два генератора *I* и *II*, а сред-



Фиг. 234. Трехпроводная сеть, с неприсоединенным уравнительным проводом.

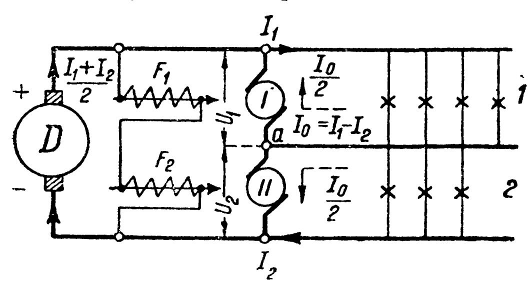


Фиг. 235. Трехпроводная сеть, питаемая двумя генераторами.

ний провод присоединить так, как показано на фиг. 235. Здесь обе половины сети, верхняя и нижняя, могут работать независимо друг от друга.

Нетрудно убедиться, изучая фиг. 235, что в среднем, или (как его иногда называют) „нулевом", проводе течет разность токов I_1—I_2; поэтому сечение этого провода может быть вообще взято меньше, чем сечение крайних проводов трехпроводной линии.

§ 106. Делительные машины. Недостатком описанной выше системы (согласно фиг. 235) является необходимость иметь на центральной станции две одинаковых машины на половинное напряжение сети. Есть, однако, возможность обойти это затруднение при помощи схемы, изображенной на фиг. 236.



Фиг. 236. Главная динамомашина *D* и „уравнительные" машины *I-II*.

На этой схеме показана динамомашина *D*, питающая крайние провода трехпроводной сети; параллельно с машиной *D* соединены две сидящих на одном валу динамомашины *I* и *II* (в дальнейшем будем называть эти динамомашины „уравнительными").

Благодаря наличности уравнительных машин *I* и *II* напряжения в обеих половинах сети будут приблизительно равны друг другу даже при неодинаковой нагрузке их.

Для того чтобы выяснить роль машин *I* и *II*, предположим сначала, что обе половины сети *I* и *II* нагружены одинаково. В этом случае напряжения обеих половин равны друг другу: $U_1 = U_2$. Уравнительные машины *I* и *II* при этом будут работать вхолостую в качестве двух последовательно соединенных двигателей.

Теперь предположим, что обе половины сети нагружены неодинаково, например, предположим, что сеть *1* нагружена сильнее, чем сеть *2*, как это показано на фиг. 236. В результате такой неравномерной нагрузки напряжение U_1 слегка уменьшится, а напряжение U_2 соответственно возрастет, однако так, что сумма этих напряжений останется прежней и будет равна напряжению динамомашины *D*:

$$U = U_1 + U_2.$$

В результате окажется следующее: при этих условиях противо-э. д. с. машины *II* будет меньше напряжения U_2, и машина *II* будет работать как двигатель; противо-э. д. с. машины *I* будет больше напряжения U_1, и машина будет работать как генератор, посылая добавочный ток в более сильно нагруженную сеть *1*.

Если бы была нагружена сильнее сеть *2*, то как генератор стала бы работать машина *II* (посылая добавочной ток в сеть *2*) и как двигатель стала бы работать машина *I*.

§ 107. Величина напряжений U_1 и U_2 уравнительных машин. Опыт показывает, что напряжения U_1 и U_2 трехпроводной сети согласно фиг. 236 при неравенстве нагрузок в обеих половинах сети *1* и *2* слегка отличаются друг от друга.

Попытаемся выяснить причину этого. Пренебрегая для первого приближения влиянием реакции якоря, предположим, что э. д. с. *E*, индуктированные в якорях машин *I* и *II*, одинаковы.

Пренебрегая потерями в машинах *I* и *II*, найдем, что ток среднего провода I_0, входя в точку *a* (фиг. 236), затем делится приблизительно поровну: одна половина $\frac{I_0}{2}$ протекает через якорь машины *I* (работающей как генератор) и другая половина $\frac{I_0}{2}$ протекает через якорь другой машины *II* (работающей как двигатель).

Обозначив через R_a сопротивление якоря (включая сопротивление щеточных контактов на коллекторе) каждой машины *I* и *II* и пренебрегая влиянием реакции якоря, найдем величину напряжения сильнее нагруженной ветви:

$$U_1 = E - R_a \frac{I_0}{2}.$$

Напряжение на зажимах машины *II*, работающей как двигатель, будет

$$U_2 = E + R_a \frac{I_0}{2}.$$

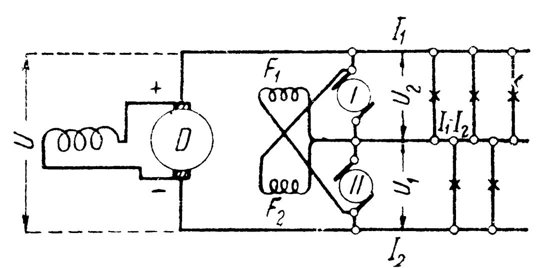
Предполагая, что возбуждения обеих машин *I* и *II* одинаковы, т. е. что

$$E = \frac{U}{2},$$

последние равенства перепишем следующим образом:

Для ветви *1*

$$U_1 = \frac{U}{2} - R_a \frac{I_0}{2};$$



Фиг. 237. Уравнительные машины *I* и *II* с перекрещенными шунтами F_1 и F_2.

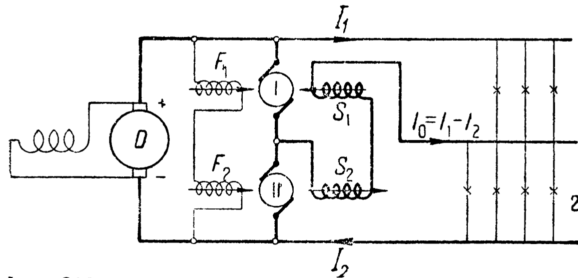
для ветви *2*

$$U_2 = \frac{U}{2} + R_a \frac{I_0}{2}.$$

Отсюда видно, что напряжения двух ветвей *1* и *2* получаются при разной их нагрузке неодинаковой величины: напряжение более нагруженной ветви получается меньше, чем напряжение менее нагруженной ветви.

§ 108. Смешанное возбуждение уравнительных машин. Во избежание недостатка, указанного в предыдущем параграфе, можно видоизменить схему соединения уравнительных машин так, как это показано на фиг. 237.

Последняя схема отличается от предыдущей тем, что концы шунтовых обмоток перекрещены таким образом, что обмотка F_1 машины *I* приключена к якорю машины *II* и обмотка F_2 машины *II* приключена к якорю машины *I*.



Фиг. 238. Уравнительные машины с компаундным возбуждением.

Благодаря этому напряжение U_1 машины *I*, работающей в данный момент как генератор (фиг. 237), слегка повышается вследствие увеличения потока, создаваемого обмоткой F_1, приключенной к менее нагруженной ветви, напряжение которой $U_2 > U_1$.

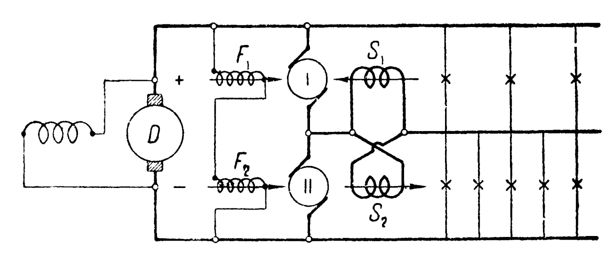
Хороших результатов в смысле равенства напряжений U_1 и U_2 можно добиться также, применяя смешанное возбуждение уравнительных машин, как показано на фиг. 238.

Как видно из этой фиг. 238, машины *I* и *II* кроме шунтовых обмоток F_1 и F_2 еще имеют последовательные обмотки S_1 и S_2, включенные в нулевой провод.

Действие этой схемы следующее:

При одинаковых нагрузках ветвей *1* и *2* ток в уравнительном проводе равен нулю и обмотки S_1 и S_2 не создают никаких потоков.

При неравенстве нагрузок ветвей *1* и *2* в нулевом проводе появляется ток I_0, обтекающий обмотки S_1 и S_2 в обратном направлении. Благодаря этому магнитный поток машины *I*, идущей в данный момент двигателем, ослабляется, а поток машины *II*, работающей в качестве генератора, возрастает. Таким образом напряжение на зажимах машины *I* и ветви *1* понижается и напряжение на зажимах машины *II* и ветви *2* повышается.



Фиг. 239. Уравнительные машины с компаундным возбуждением.

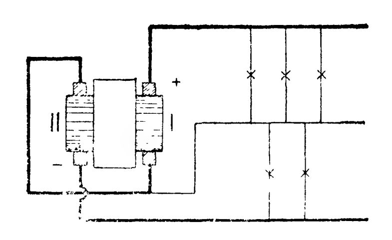
Точно так же можно показать, что при перегрузке ветви *1* напряжение на зажимах машины *I* возрастает, а напряжение на зажимах машины *II* уменьшается.

Вместо последовательного соединения обмоток S_1 и S_2, показанных на фиг. 238, можно применить также параллельное соединение обмоток S_1 и S_2 согласно фиг. 239.

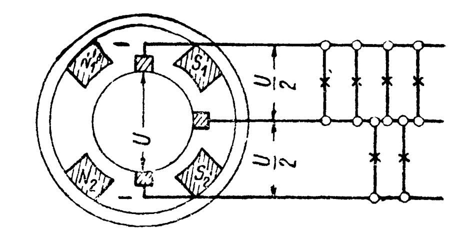
В. ГЕНЕРАТОРЫ ДЛЯ ПИТАНИЯ ТРЕХПРОВОДНЫХ СЕТЕЙ

§ 109. Прежние конструкции. Выше была описана схема для питания трехпроводной сети, состоящая из двух последовательно соединенных динамомашин *I* и *II* (фиг. 235).

Можно попытаться упростить схему фиг. 235, соединив машины *I* и *II* в одну.



Фиг. 240. Машина с двумя коллекторами для питания трехпроводный сети.



Фиг. 241. Машина для питания трехпроводной сети по Детмару и Ротерту.

Такая машина показана на фиг. 240; на якоре этой машины расположены две независимых обмотки, присоединенных к двум коллекторам *I* и *II*.

Соединяя оба коллектора последовательно, можно питать такой машиной трехпроводную сеть, как показано на фиг. 240.

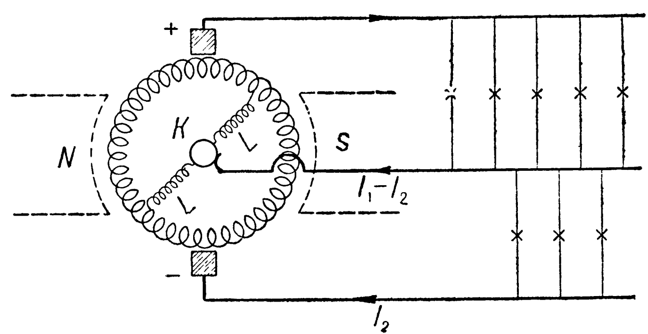
Недостатком этой машины является необходимость иметь два коллектора. Детмар и Ротерт (Dettmar и Rothert) устранили этот недостаток в машине специальной конструкции, изображенной на фиг. 241.

На этой фигуре показана двухполюсная машина, имеющая один двойной северный полюс N_1N_2 и один двойной южный S_1S_2.

Кроме главных щеток, приключенных к внешним проводам трехпроводной линии, здесь еще имеется третья щетка a, приключенная к среднему проводу. Благодаря такой конструкции полное напряжение машины U делится щеткой a на две равных половины $\frac{U}{2}$.

Конструкция двойных полюсов вызвана необходимостью создать хорошие условия коммутации для средней щетки a (если бы пространство между полюсами S_1 и S_2 и N_1 и N_2 было заполнено сплошь железом, то сильно возросла бы разность потенциалов между смежными коллекторными пластинами, перекрываемыми щеткой a, в результате чего появилось бы под этой щеткой искрение).

§ 110. Динамомашина для трехпроводной сети с делителем напряжения Доливо-Добровольского. Рассмотренные нами выше схемы фиг. 240 и 241 благодаря своей сложности и некоторым другим отрицательным свойствам, о которых упоминалось, в настоящее время не нашли распространения на практике.



Фиг. 242. Машина для трехпроводной сети Доливо-Добровольского (с одним контактным кольцом K).

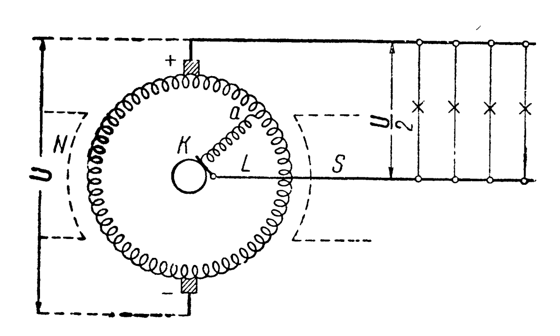
Чрезвычайно простой метод деления напряжения в одной машине дал Доливо-Добровольский; на фиг. 242 изображена предложенная им машина для питания трехпроводной сети.

Как видно из фигуры, от машины обычного типа машина Доливо-Добровольского отличается только наличностью контактного кольца K, к которому присоединены концы двух катушек самоиндукции L и L, расположенных на валу якоря и вращающихся вместе с ним; другие концы самоиндукции L и L, как видно из фигуры, присоединены к двум диаметрально противоположным точкам обмотки якоря. Крайние провода трехпровод-

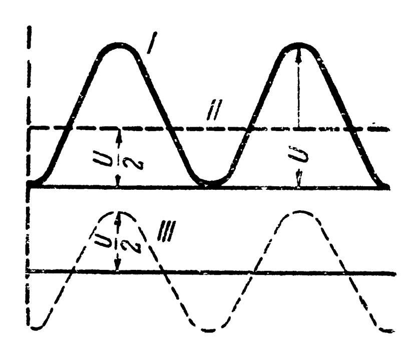
ной линии присоединены к щеткам $+-$ на коллекторе, а средний провод посредством щетки соединен с контактным кольцом K.

Для того чтобы выяснить принцип, на котором основано действие такой машины, предположим сначала, что отсоединена одна из дроссельных катушек L и что нижний провод трехпроводной сети также отсоединен, как показано на фиг. 243; попытаемся найти величину напряжения, действующего между верхним и нулевым проводом сети, приключенным к кольцу K машины.

При вращении якоря напряжение между кольцом K и щеткой $+$ будет периодически колебаться от нуля (когда точка a проходит под щеткой $+$) до максимальной величины, равной U (когда точка a проходит под щеткой $-$).



Фиг. 243. Получение половинного напряжения $\frac{U}{2}$ от динамомашины с одним контактным кольцом K.



Фиг. 244.

Кривая напряжения, которая получится при этом, изображена на фиг. 244 в виде синусоидальной кривой I. Как видно из этой фигуры, синусоида I приподнята относительно оси абсцисс на расстояние $\frac{U}{2}$.

Поэтому кривую напряжения I мы можем рассматривать как некоторую результирующую кривую, образованную путем суммирования ординат синусоиды III с амплитудой, равной $\frac{U}{2}$, и прямой II, смещенной относительно оси абсцисс на расстояние $\frac{U}{2}$.

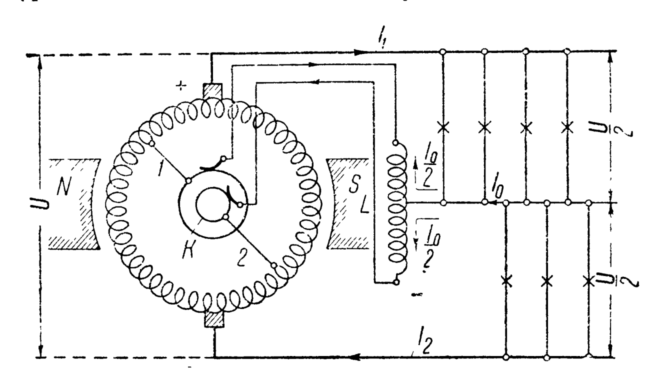
Отсюда следует, что во внешней цепи машины согласно фиг. 243 будут течь постоянный и переменный токи; последний, однако, будет очень небольшой величины благодаря действию катушки самоиндукции L, представляющей собой для переменного тока большое сопротивление и беспрепятственно пропускающей постоянный ток.

Если теперь перейти от схемы фиг. 243 к схеме фиг. 242 (которая в действительности выполняется на практике), то мы увидим,

что нулевой провод, присоединенный к кольцу K, будет делить приблизительно пополам напряжение между щетками + и — машины, несмотря на возможно неравномерную нагрузку верхней и нижней половин сети.

При схеме фиг. 242 катушки самоиндукции L и L должны вращаться вместе с якорем.

Пристраивая к машине вместо одного два контактных кольца K (фиг. 245) и соединяя их с двумя диаметрально противо-



Фиг. 245. Трехпроводная машина с двумя контактными кольцами K.

положными точками обмотки якоря 1 и 2, можно катушку самоиндукции L расположить неподвижно и отдельно от машины, как показано на этой фигуре.

§ 111. Другие системы трехпроводных машин. Можно видоизменить машину Доливо-Добровольского, выполнив катушки L и L самоиндукции (фиг. 242) в виде равномерно распределенной обмотки и поместив провода этой дополнительной обмотки в пазы самого якоря машины. Идею такой машины, предложенной Пихлером, [1] поясняет фиг. 246.

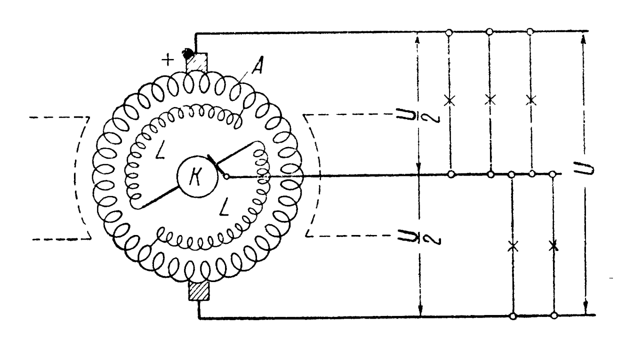
Как видно из этой фигуры, в пазах якоря машины расположены две обмотки: главная обмотка A, присоединенная к коллектору, и вспомогательная обмотка LL, играющая роль катушек самоиндукции.

Концы обмотки LL присоединены к двум диаметрально противоположным точкам якоря, а начала присоединены к контактному кольцу K.

При вращении якоря э. д. с. наводится не только в рабочей обмотке A, но также в обмотке LL; в случае соединения обмоток A и LL согласно фиг. 246 э. д. с., индуктированные в них, направлены друг против друга. Поэтому, взяв в обмотке LL число проводов равным числу проводов одной параллельной ветви главной обмотки A, мы можем быть уверены, что в обмотке LL не будет течь никакого переменного тока; это свойство машины выгодно отличает ее от

[1] См. Zeitschrift für Elektrotechnik, Wien, 1897.

машины Доливо-Добровольского, при которой, как мы видели выше, в катушках самоиндукции *LL* течет (правда, небольшой) переменный ток.



Фиг. 246. Трехпроводная машина Пихлера.

Кроме описанной здесь машины известно еще несколько схем трехпроводной машины Оссанны (Osanna), построенной на таком же принципе, что и машина Пихлера, но отличающейся большим количеством катушек самоиндукции *LL*, чем на фиг. 246.[1]

ГЛАВА ШЕСТНАДЦАТАЯ

МАШИНЫ СО СПЕЦИАЛЬНЫМИ ХАРАКТЕРИСТИКАМИ

Есть случаи, когда динамомашины обычных систем возбуждения (шунтового, сериес и компаундного) не удовлетворяют предъявляемым к ним требованиям.

В качестве примера здесь можно привести: динамомашины для освещения поездов [которые, обычно будучи приводимы во вращение от шкива, сидящего на оси вагона (см. ниже фиг. 265), должны давать приблизительно постоянное напряжение при колебании скорости машины в широких пределах], машины для электрической сварки, для питания прожекторов (которые должны давать приблизительно постоянную величину тока, несмотря на изменение величины сопротивления внешней цепи в широких пределах) и т. п.

§ 112. Электрические машины для электрической сварки на постоянном токе. Попытки использования вольтовой дуги с ее высокой температурой, около 3800°C, для целей сварки и резки металлов были начаты уже давно (опыты Славянова, Бенардоса и др.); однако лишь сравнительно недавно электрический метод сварки и резки металлов начал получать широкое распространение.

---

[1] См. Starkstromtechnik, Taschenbuch fur Elektrotechniker, Rziha & Seidener, Berlin, 1922.

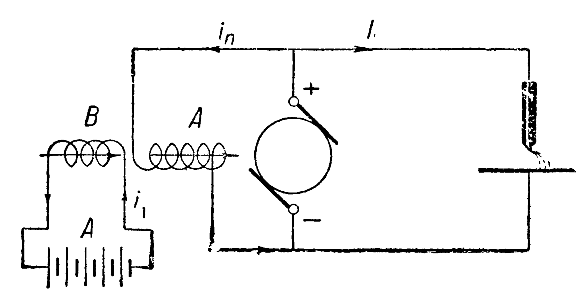
В то время как раньше сварка электрической дугой применялась, главным образом, только для исправления неудачных отливок, в настоящее время этот способ получил весьма большое значение в различных технологических процессах при изготовлении новых сложных сварных конструкций из листового железа.

Дальнейшему все большему и большему внедрению в производство электрической сварки способствует весьма большая простота самого процесса, его дешевизна и почти универсальная возможность применения при самых различных технологических условиях.

Можно без преувеличения сказать, что электрическая дуговая сварка, дающая возможность весьма простого и надежного соединения в одно целое металлических листов деталей самых разнообразных профилей, произвела целый переворот в области машиностроения.

В настоящее время электрическая сварка, как известно, находит применение на постоянном и переменном токах.

§ 113. Машины для электрической сварки Кремера. В машинах этого рода обычно кроме шунтовой обмотки есть еще обмотка, питаемая от независимого источника (фиг. 247).



Фиг. 247. Машина для электрической сварки системы Кремера.

Такое усложнение схемы необходимо для получения специальной характеристики, особенности которой можно видеть на фиг. 248.

В характеристике шунтовой машины обычного типа имеется неустойчивая часть (пунктир, на фиг. 249), поэтому при коротких замыканиях такая шунтовая машина уменьшает („сбрасывает“) нагрузку.

Немного усложнив схему обычной шунтовой машины путем добавления еще одной обмотки возбуждения B, питаемой от независимого источника электрической энергии, например, аккумуляторной батареи A (фиг. 247), можно получить внешнюю характеристику вроде показанной на фиг. 248.

При такой характеристике, как видно из фиг. 248, начиная с некоторой величины, ток I остается приблизительно постоянным, несмотря на значительное изменение напряжения U на коллекторе машины. Такая характеристика является чрезвычайно желательной в известных случаях, например, при работе машины на электрическую дугу прожектора или при электрической сварке.

Как получить показанную на фиг. 248 характеристику?

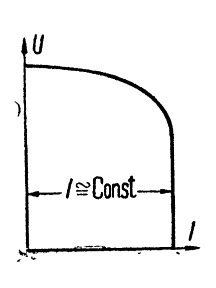
Эта задача была решена инж. Кремером упомянутым выше и поясняемым на фиг. 247 образом. [1]

Для нахождения внешней характеристики машины с возбуждением согласно фиг. 247 обратимся сначала к намагничивающей характеристике *I*, которая представляет собой зависимость между током возбуждения i_n и э. д. с. машины *E* (фиг. 250).

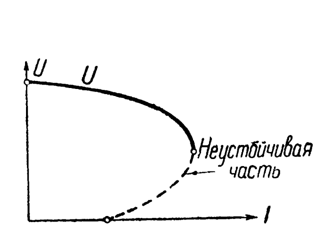
Если бы мы имели дело с машиной шунтового возбуждения, то для нахождения величины э. д. с., до которой машина при данных условиях работы должна была бы возбудиться, через начало координат *O* мы должны были бы провести некоторую наклонную прямую, графически изображающую уравнение (фиг. 250)

$$U = i_n r_n.$$

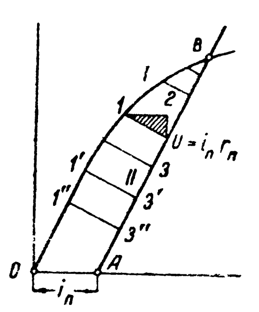
В случае схемы, изображенной на фиг. 247, кроме шунтовой обмотки *A*, имеется еще другая обмотка *B*, создающая добавоч-



Фиг. 248.



Фиг. 249. Внешняя характеристика шунтовой машины.



Фиг. 250. Построение внешней характеристики для шунтового генератора.

ные ампервитки в цепи возбуждения. Влияние последних на фиг. 250 мы можем учесть, проводя наклонную прямую *II* не через начало координат, как это мы делали раньше (фиг. 205), а отступив от точки *O* вправо на расстояние *OA*, пропорциональное тем добавочным ампервиткам, которые дает обмотка *B*, т. е. на расстояние, пропорциональное величине тока i_1, текущего в добавочной обмотке *B* (при равном числе витков обмоток *A* и *B*).

На фиг. 250 прямая *II* пересекает кривую *I* в точке *B*; расстояние от этой точки *B* до оси абсцисс в некотором масштабе дает нам величину той э. д. с., до которой возбудится машина согласно схеме фиг. 247.

Для получения внешней характеристики такой машины мы можем выполнить графические построения, аналогичные приведенным раньше; мы можем построить для какого-нибудь данного возбуждения характеристичный треугольник, у которого горизонтальный катет *1-2* в некотором масштабе дает величину размагничивающих ампервитков AW_r реакции якоря машины,

[1] „ETZ“, 1909, стр. 789.

а вертикальный катет *2-3*—величину падения напряжения в якоре I_aR_a.

Проводя затем ряд прямых *1'-3'*, *1''-3''* и т. д., параллельных гипотенузе *1-3*, мы найдем, что полученные таким образом отрезки *1'-3'*, *1''-3''* и т. д. в некотором масштабе изображают нам токи якоря машины *I* при разных величинах нагрузки машины.

Рассматривая фиг. 250, мы видим, что, начиная с некоторого значения *U*, отрезки *1'-3'*, *1''-3''* и т. д. приблизительно сохраняют при всех изменениях *U* свою величину неизменной, т. е., другими словами, это значит, что ток машины *I* при этих условиях сохраняется приблизительно постоянным.

Обязательным условием для получения такого постоянства тока *I* является следующее: прямая *II* на фиг. 250 должна быть приблизительно параллельна прямолинейной части характеристики *I*. Эта параллельность всегда может быть осуществлена путем соответственного подбора величины сопротивления r_n цепи обмотки *A*, которое влияет на величину наклона прямой *II*, изображаемой уравнением (фиг. 250)

$$U = i_n r_n.$$

Если построить кривую зависимости между *U* и *I*, принимая во внимание, что отрезки *1-3*, *1'-3'* и т. д. на фиг. 250, как уже было сказано, в некотором масштабе дают нам величину тока *I*, то получится характеристика фиг. 248, из которой видно, что ток *I*, начиная с некоторого момента, сохраняет свою величину приблизительно постоянной, несмотря на изменение напряжения *U* в широких пределах соответственно изменениям сопротивления внешней цепи, вплоть до короткого замыкания.

§ 114. Сварочная динамомашина Американской всеобщей электрической компании. [1] Недостатком описанной выше динамомашины Кремера является усложняющая схему наличность аккумуляторной батареи *A* (фиг. 247).

Можно упростить эту схему путем исключения из схемы батареи *A*.

На фиг. 251 изображена такая упрощенная динамомашина.

Как видно из фиг. 251, на коллекторе динамомашины расположены три щетки: рабочие щетки *A* и *C*, которые питают вольтову дугу *D*, и одна вспомогательная щетка *B*, о назначении которой будет сказано ниже.

Машина имеет два полюса северных — N_1 и N_2 и два южных — S_1 и S_2.

В отличие от обычной конструкции полюса разной полярности в этой машине не все чередуются, а расположены таким образом, что рядом с северным полюсом N_1 расположен одноименный N_2 и рядом с южным полюсом S_1—одноименный полюс S_2.

Таким образом, несмотря на наличность четырех полюсов,

---

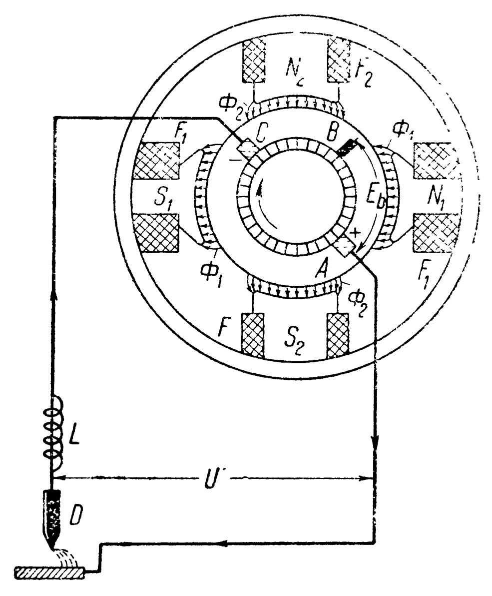
[1] См. „General Electric Rewiew“ № 2, 1925.

показанных на фиг. 251, мы в сущности имеем здесь дело всего-навсего с двумя двойными полюсами: северным полюсом N_1N_2 и южным полюсом S_1S_2.

Цель такого расчленения полюсов будет ясна из дальнейшего.

Как видно из фиг. 251, одна пара полюсов N_1S_1 имеет меньшее сечение сердечников с целью довести магнитное насыщение их до более высокой степени; другая пара N_2S_2 имеет большее сечение, и магнитное насыщение их обычно невелико. Обмотки всех четырех полюсов соединены между собой последовательно и присоединены к паре щеток AB, как показано на фиг. 252.

Как будет показано ниже,



Фиг. 251. Машина для электрической сварки.

Фиг. 252. Динамомашина для электрической сварки.

напряжение E_b между главной щеткой A и вспомогательной щеткой B практически не зависит от нагрузки, оставаясь при всяких значениях тока I приблизительно постоянным.

Как видно из фиг. 251 и 252, полюса N_1N_2 и S_1S_2 создают два потока Φ_1 и Φ_2.

При нагрузке машины появляется реакция якоря. Для выяснения ее влияния разложим поле реакции якоря Φ_a на две слагающие: Φ_a'' и Φ_a'. Как видно из фиг. 252, Φ_a' совпадает по направлению с потоком Φ_1, а Φ_a'' действует против потока Φ_2. Под влиянием этого поток F_1 усиливается, а поток обмотки F_2 ослабляется.

Для выснения характера изменения этих потоков рассмотрим соответственные кривые магнитных индукций в воздушном зазоре, создаваемых этими потоками B_1 и B_2 (фиг. 253).

Как видно из фиг. 253, *a*, кривые B_1 и B_2 имеют симметрическую форму только при холостом ходе, когда $I = 0$.

При нагрузке появляются ампервитки реакции якоря AW_a (фиг. 253, *b*), в результате чего магнитная индукция в разных точках под левым полюсом уменьшается до B_2', а под правым полюсом эта индукция B_1 возрастает до величины B_1' (фиг. 253, *a*).

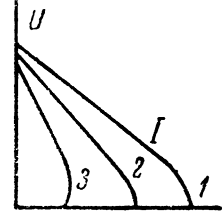
Фиг. 253. Кривые для сварочной машины согласно фиг. 252: *a*—кривая магнитной индукции в воздушном зазоре при средней нагрузке; *b*—кривая ампервитков реакции якоря; *c*—кривая магнитной индукции в воздушном зазоре при большой нагрузке.

При таких условиях поток под левым полюсом (фиг. 253, *a*) уменьшится на величину $\Delta\Phi_2$, пропорциональную заштрихованной площади между кривыми B_2B_2', а поток под правым полюсом увеличится на величину $\Delta\Phi_1$. Благодаря большому насыщению полюсов N_1 и S_1 (фиг. 251) $\Delta\Phi_1$ небольшое, $\Delta\Phi_2$ полюсов N_2 и S_2, наоборот, значительно, так как эти полюса N_2 и S_2 насыщены слабо.

Благодаря этому с увеличением нагрузки величина суммарного потока $\Phi_1 + \Phi_2$ уменьшается, и напряжение U между щетками A и C, величина которого зависит от этого потока, падает (фиг. 254).

Напряжение E_b, действующее между щетками A и B, при этих условиях практически почти остается неизменным, так как возрастание потока $\Delta\Phi_1$ здесь относительно невелико.

Напряжение E_b в этой машине играет такую же роль, как напряжение аккумуляторной батареи A на фиг. 247. Таким образом в динамомашине фиг. 251 как бы совмещены в одно целое машина, показанная на фиг. 247, и ее аккумуляторная батарея A.



Фиг. 254. Характеристика сварочной машины.

Внизу (на фиг. 253, *c*) показаны кривые B_2' и B_1' при большой нагрузке машины.

Как видно, реакция якоря при этих условиях настолько велика, что магнитная индукция на большом протяжении под левым полюсом изменяет свой знак (кривая B_1'); в результате суммарный магнитный поток $\Phi_1 + \Phi_2$ должен уменьшиться, а вместе с ним и напряжение U.

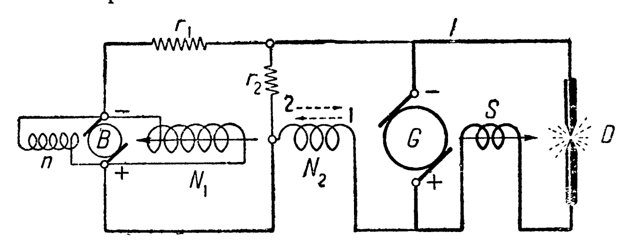
При этой машине согласно фиг. 251 получается внешняя характеристика типа фиг. 254, наклон линий *1-2-3*, показанных на этой фигуре, зависит от угла сдвига главных щеток генератора.

Такие же приблизительно характеристики, как на фиг. 254, можно также получить и в обыкновенном генераторе с проти-

вокомпаундным возбуждением (у которого сериесная обмотка включена против шунтовой обмотки так, чтобы магнитный поток машины с увеличением возбуждения уменьшался). Однако устойчивость такого генератора в работе будет невелика, и при случайных сильных коротких замыканиях такой генератор может перемагнититься.

§ 115. Сварочный агрегат Вестингауза. На фиг. 255 и 256 изображена схема агрегата, применяемая американской фирмой Вестингауза для питания вольтовой дуги при электрической сварке.

Как видно из фиг. 256, на одном валу сидят три машины: генератор — *G*, возбудитель — *B* и двигатель — *A*, приводящий весь агрегат во вращение.



Фиг. 255. Схема соединений в сварочном агрегате Вестингауза. *G*—генератор; *S*, N_1 и N_2—его обмотки возбуждения; *B*—возбудитель; *A*—его обмотка возбуждения; *D*—вольтова дуга.

Генератор *G* имеет (фиг. 255) три обмотки возбуждения обмотка N_1 питается якорем возбудителя *B*, обмотка N_2 получает одновременно питание от якоря *B* и якоря *G* и, наконец, сериесная обмотка *S* питается главным током *I*. Обмотка *S* создает поле, направленное противоположно полю обмотки N_1, т. е., другими словами, катушка *S* является противокомпаундной. Обмотка N_1 создает полезный магнитный поток.

Третья обмотка возбуждения генератора *G* — обмотка N_2 — является оригинальной частью всей схемы. Эта обмотка может обтекаться током в разных направлениях в зависимости от величины сопротивления дуги *D*.

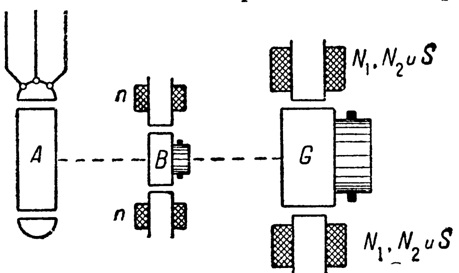
При разомкнутых электродах *D* (или при нормальной длине дуги) обмотка N_2 возбуждается, главным образом, генератором *G* и создает поле, направленное в ту же сторону, что и поле N_1 (см. стрелку *1* на фиг. 255).

При коротком замыкании дуги *D* напряжение на коллекторе генератора *G* резко понижается (почти падает до нуля) и ток из возбудителя *B* устремляется в обмотку N_2 в обратном направлении (показанном на чертеже стрелкой *2*), благодаря чему происходит ослабление магнитного потока генератора *G* (который, как было сказано выше, создается сообща всеми тремя обмотками N_2, N_1 и *S*).

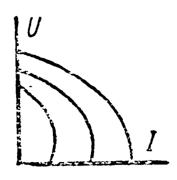
На фиг. 257 показаны внешние характеристики, получаемые

от такого агрегата при разных величинах возбуждения генератора.

Как видно из этой фигуры, форма этих характеристик несколько напоминает кривые для сварочного генератора Амери-



Фиг. 256. Сварочный агрегат Вестингауза. G — главная машина; B — возбудитель; A — асинхронный двигатель, вращающий весь агрегат.



Фиг. 257. Характеристика генератора Вестингауза (фиг. 255).

канской всеобщей электрической компании (GEC), описанного выше.

§ 116. Сварочная машина Розенберга. Большую известность в настоящее время получила сварочная машина Розенберга (Rosenberg).[1] На фиг. 258 показана эта машина в схематическом изображении.

Как видно из фиг. 258, эта машина снабжена двумя полюсами; станина выполнена в виде сравнительно тонкостенного сварного цилиндра из котельного железа. К этой цилиндрической станине приварены два полюса в виде полых цилиндров, внутрь которых могут ввинчиваться два массивных поршнеобразного вида железных цилиндра. Ввертывая и вывертывая последние при помощи соответственных маховичков, мы можем изменить величину магнитного сопротивления цепи, что в свою очередь, как будет показано ниже, дает возможность регулировать ток в цепи электрической сварки.

К вышеописанным полым полюсам привернуто два с сильно развитыми размерами полюсных наконечника, имеющих в середине по вырезу.

Якорь машины имеет двухполюсную стержневую обмотку. На его коллекторе расположены две пары щеток; рабочие щетки B_1 и B_2, расположенные под серединой полюсов, питают цепь вольтовой дуги; вспомогательные щетки b_1 и b_2, расположенные в нейтральной зоне, соединены друг с другом на короткое (на фиг. 258 показано расположение щеток при кольцевом якоре; в случае барабанной обмотки соответственные щетки должны быть смещены по сравнению с фиг. 258 на 90°).

Магнитные потоки в машине Розенберга. В машине, согласно фиг. 258, создаются при работе два магнитных потока.

---

[1] См. „ETZ" № 2, 1923, E. u. M, № 3, 1928; „ETZ" № 5 и 33, 1929.

Один магнитный поток Φ_y создается теми ампервитками якоря AW_y, ось которых совпадает с осью вспомогательных щеток b_1 и b_2 (и следовательно, на фиг. 258 ось потока Φ_y должна быть направлена по вертикали).

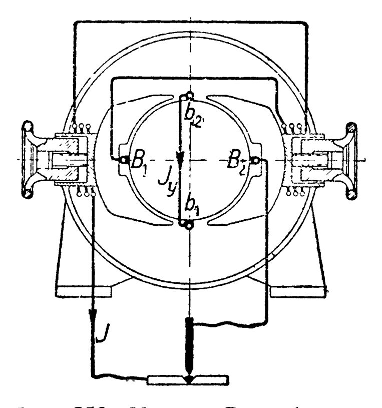
Ось другого магнитного потока Φ_x направлена по горизонтали (в направлении рабочих щеток B_1 и B_2); этот поток Φ_x вызывается разностью ампервитков полюсов возбуждения AW_b и ампервитков реакции якоря AW_x (в направлении щеток B_1 и B_2); таким образом мы можем написать:

$$\Phi_y = \frac{AW_y}{R_y} \text{(„вертикальный“ поток)}, \qquad (116,1)$$

$$\Phi_x = \frac{AW_b - AW_x}{R_x} \text{(„горизонтальный“ поток)}, \qquad (116,2)$$

где R_y и R_x — магнитные сопротивления цепей потоков Φ_y и Φ_x.

Принцип действия сварочной машины Розенберга. При вращении якоря благодаря небольшому остаточному горизонтальному потоку Φ_x в проводах якоря, пересекающих это поле Φ_x, наводятся э. д. с., в результате чего в цепи короткозамкнутых щеток b_1 и b_2 начинает течь ток I_y.



Фиг. 258. Машина Розенберга.

Ампервитки якоря AW_y, создаваемые этим током I_y, вызывают поток Φ_y, ось которого на фиг. 258 направлена по вертикали (поток Φ_y замыкается, главным образом, через железо полюсных наконечников, которые для этой цели имеют увеличенные размеры). Вследствие вращения якоря в „вертикальном“ поле Φ_y между „горизонтальными“ щетками B_1 и B_2 появляется разность потенциалов E, от величины которой зависит рабочий ток I. Таким образом магнитным потоком, являющимся причиной появления рабочего тока в этой машине, является поток Φ_y.

Внешняя характеристика сварочной машины. Сварочная машина Розенберга имеет резко падающую внешнюю характеристику, являющуюся весьма удобной для целей электрической сварки (фиг. 259).

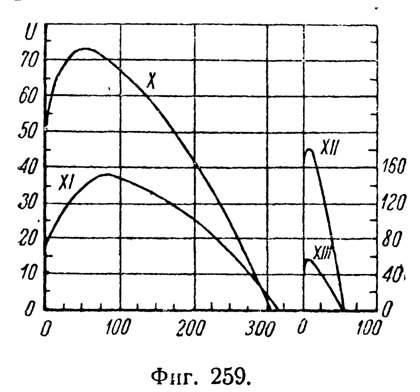
„Падающий“ характер характеристики этой машины можно легко себе объяснить, обратившись к уравнению (116,2):

$$\Phi_x = \frac{AW_b - AW_x}{R_x}.$$

При возрастании рабочего тока I машины (текущего в цепи сварочной дуги) магнитный поток Φ_x здесь не возрастает, как могло бы показаться на первый взгляд, но убывает, начиная с некоторой нагрузки.

Это уменьшение магнитного потока Φ_x здесь обусловлено очень большим магнитным насыщением, допущенным в цепи потока Φ_x [1] и связанным с этим большим магнитным рассеянием.

При возрастании тока I увеличивается магнитное насыщение отдельных участков цепи потока Φ_x (в особенности сильно возрастает магнитное насыщение станины, выполненной здесь в виде железного цилиндра весьма небольшого сечения). В соответствии с этим при увеличении тока I возрастает не только магнитное сопротивление цепи R_x [входящее в знаменатель выражения (116,2)], но также возрастает весьма значительно и магнитное рассеяние, в результате чего магнитный поток машины Φ_x при этих условиях, т. е. при возрастании тока I, не увеличивается, а уменьшается.

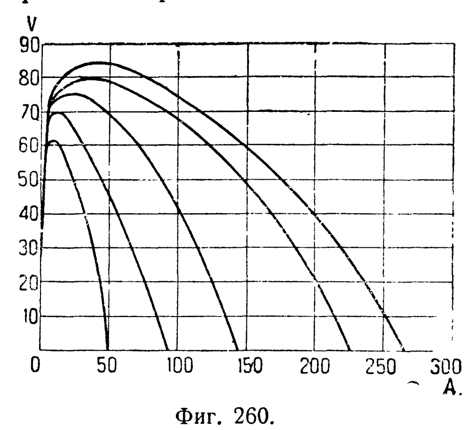


Фиг. 259.

Последнее обстоятельство влечет за собой соответственное уменьшение тока I_y, текущего в проводе b_1b_2, в результате чего поток возбуждения Φ_y машины при возрастании I также уменьшается.

Таким образом при возрастании рабочего тока I в машине Розенберга поток возбуждения Φ_y, создаваемый обмоткой якоря, уменьшается, и в результате напряжение на щетках B_1 и B_2 падает.

Влияние регулировки магнитного сопротивления полюсов. Перемещая внутренние сердечники магнитных полюсов в ту или другую сторону при помощи маховиков, показанных на фиг. 258, мы можем изменять величину магнитного сопротивления цепи R_x; в результате этого величина „горизонтального“ магнитного потока Φ_x будет также меняться, а вместе с этим будет меняться также и ток I_y в короткозамкнутых щетках b_1 и b_2, что вызовет в свою очередь соответственное изменение потока возбуждения Φ_y; от последней же величины зависит рабочее напряжение машины (между щетками B_1 и B_2) и, следовательно, рабочий ток I.



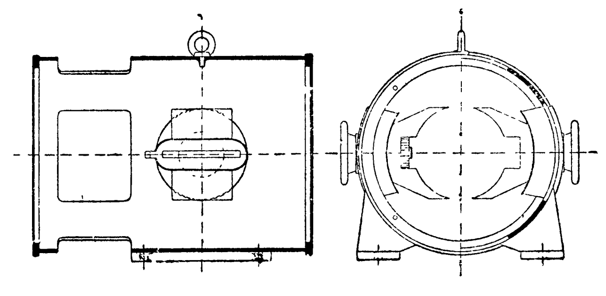
Фиг. 260.

Например, выдвигая внутренние сердечники из полюсов, мы увеличиваем магнитное сопротивление последних, в результате

[1] Вследствие малого сечения цилиндрической станины машины.

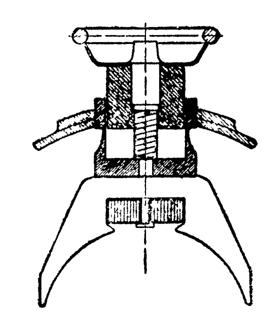
чего поток Φ_x, как показывает уравнение (116,2), должен уменьшиться, что повлечет за собой соответственное уменьшение тока I_y в проводе b_1b_2 и как результат — уменьшение потока возбуждения Φ_y и уменьшение рабочего напряжения на щетках B_1 и B_2.

Таким образом мы видим, что для уменьшения тока, текущего в цепи вольтовой дуги, необходимо выдвинуть внутренние сердечники из полюсов (фиг. 258).



Фиг. 261.

На фиг. 259 показаны две внешних характеристики одной такой машины Розенберга при разных положениях внутренних сердечников в полюсах; при этом хактеристика с большим током короткого замыкания (около 320 А на фиг. 259) получена при вдвинутых сердечниках полюсов, а характеристика с меньшим током короткого замыкания — при совершенно выдвинутых сердечниках (кривые *X-XI*). На фиг. 259 показано также, как изменяется величина тока в короткозамкнутых щетках при этих условиях (кривые *XII-XIII*). На фиг. 260 показана серия внешних характеристик машины Розенберга, полученных при разных положениях полюсных сердечников, причем характеристика с наибольшим током короткого замыкания получена при совершенно вдвинутых внутрь полюсных сердечниках.



Фиг. 262.

Таким образом мы видим, что в машине Розенберга может быть весьма удобно достигнута регулировка сварочного тока и получена внешняя характеристика, наиболее подходящая для данных условий сварки.

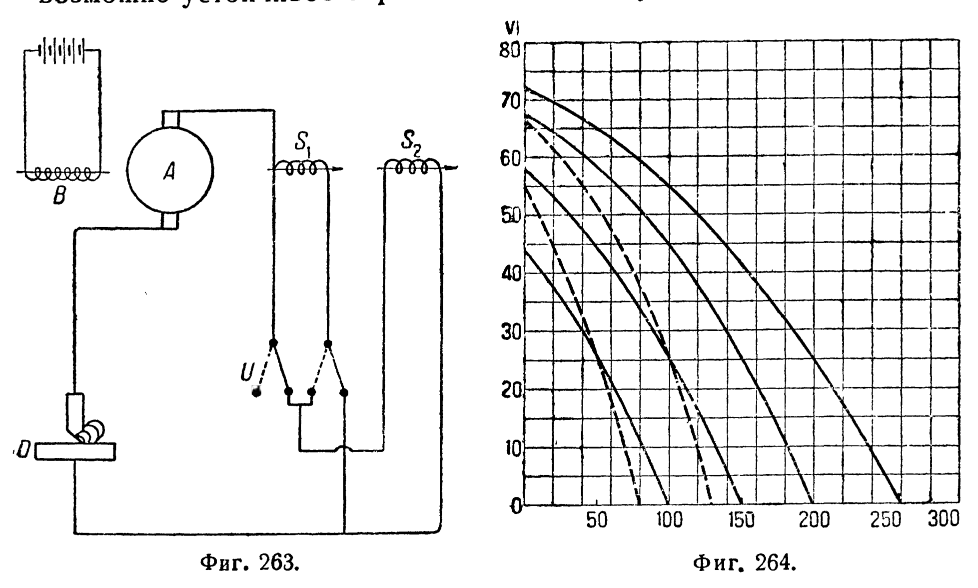
На фиг. 261 показана станина с полюсами одной такой машины Розенберга.

На фиг. 262 показана новая конструкция главного регулируемого полюса машины Розенберга. Как видно из этой фигуры, стенки полого полюсного сердечника здесь имеют переменную толщину. При такой конструкции можно добиться того, что изменение общего магнитного сопротивления цепи будет происходить почти прямо пропорционально перемещению внутреннего сердечника полюса; таким образом здесь сила рабочего тока машины будет изменяться приблизительно пропорционально длине перемещения внутреннего сердечника полюса. На фиг. 262 показан также дополнительный полюс для улучшения коммутации.

Генератор для электрической сварки с противокомпаундным возбуждением.[1] В предыдущих параграфах было дано описание сварочного генератора Розенберга, который от нормальных машин отличается специальной конструкцией магнитной системы и якоря.

Можно, однако, попытаться приспособить для целей дуговой сварки также генератор постоянного тока нормальной конструкции.

Для того чтобы в цепи вольтовой дуги сделать излишними добавочные сопротивления, такой генератор должен обладать сильно „падающей“ внешней характеристикой, при которой возможно устойчивое горение вольтовой дуги.



Фиг. 263. Фиг. 264.

Для получения такой характеристики германский завод „Саксенверке“ применяет противокомпаундное возбуждение.

Схема сварочной машины этого завода показана на фиг. 263. На этой фигуре означают:

A — якорь машины;

B — обмотка независимого возбуждения;

S_1 и S_2 — противокомпаундные обмотки;

U — переключатель,

D — вольтова дуга.

Как показано на фиг. 263, противокомпаундная обмотка здесь разделена на две половины S_1 и S_2. Эти части S_1 и S_2 при помощи переключателя могут быть соединяемы между собой параллельно или последовательно.

При правом положении переключателя на фиг. 263 обмотки S_1 и S_2 оказываются соединенными параллельно.

---

[1] См. „Sachsenwerke-Mitteilungen“ № 1, 1930.

В том случае, если для электрической сварки необходимо уменьшить силу тока машины, переключатель U переводится в левое положение, после чего обмотки S_1 и S_2 оказываются соединенными последовательно, и размагничивающее действие обмоток S_1 и S_2 таким образом увеличивается.

На фиг. 264 показаны внешние характеристики такого генератора, причем пунктирные кривые относятся к тому случаю, когда противокомпаундные обмотки S_1 и S_2 соединены последовательно, а сплошные кривые, — когда эти обмотки соединены параллельно.

§ 117. Машины для освещения железнодорожных поездов. Эти машины обычно располагаются под кузовом железнодорожного вагона и вращаются ремнем от шкива, сидящего на оси вагона.

Машины этого типа должны давать приблизительно постоянное напряжение, несмотря на значительное колебание числа оборотов в минуту.

Машина Розенберга. Якорь машины Розенберга отличается от обычных машин тем, что он имеет не одну, а две пары щеток при двухполюсной схеме (фиг. 265); одну из групп этих щеток в дальнейшем будем называть рабочей, а другую — вспомогательной.

Рабочие щетки a и a машины Розенберга питают внешнюю сеть и обмотку полюсов B. Вспомогательные „поперечные" щетки b и b замкнуты на короткое. Конструктивной особенностью этой машины являются полюсные наконечники, которые имеют большие относительно размеры; цель такой конструкции будет выяснена ниже. Ток этой машины остается практически постоянным при изменении скорости машины в широких сравнительно пределах (фиг. 269).

Это замечательное свойство обусловлено характером изменения при колебании скорости некоторых двух магнитных потоков, составляющих особенность этой машины. Действие этой машины таково.

Обмотка электромагнитов B и B создает поток Φ_a, направленный по горизонтальной оси на фиг. 265. Под действием этого потока при вращении якоря в последнем индуктируется некоторая э. д. с. E_b, которая вызывает ток I_b, замыкающийся через короткое соединение щеток b и b. Обмотка якоря, обтекаемая этим током, создает свой поток Φ_b, перпендикулярный к оси полюсов потока Φ_a.[1] Поток Φ_b по выходе из якоря замыкается через полюсные наконечники, специально увеличенные для этой цели, как было сказано выше. Благодаря вращению якоря в поле Φ_b в якоре наводится еще другая э. д. с. E_a.

Для того чтобы при переменной величине скорости ($n = \text{var}$)

---

[1] Все явления в машине Розенберга происходят таким образом, как если бы в якоре были расположены две независимых обмотки (фиг. 266). Одна из этих обмоток (со щетками b и b) создает поток возбуждения Φ_b, другая обмотка (щетки a и a) создает размагничивающие ампервитки IW_a. Соединяя обе эти обмотки в одну, получим якорь машины Розенберга согласно фиг. 265.

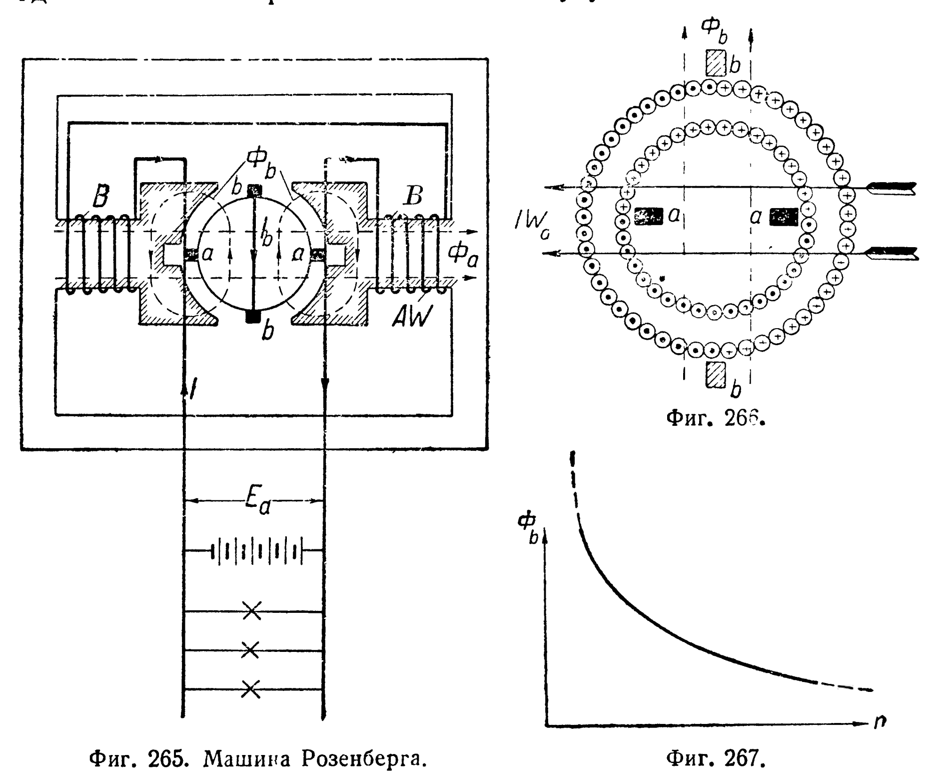
было приблизительно постоянным напряжение, действующее между щетками a и a, т. е. чтобы было

$$E_a = \Phi_b \cdot n \approx \text{const},$$

необходимо, чтобы поток Φ_b изменялся по закону, даваемому уравнением

$$\Phi_b = \frac{\text{const}}{n},$$

где n — число оборотов машины в минуту.



Фиг. 265. Машина Розенберга.

Фиг. 266.

Фиг. 267.

Таким образом мы видим, что поток возбуждения Φ_b, создаваемый обмоткой якоря, должен меняться в функции n по закону гиперболы (как показано на фиг. 267).

Поток Φ_b, следовательно, должен уменьшаться с увеличением скорости машины. В машине Розенберга благодаря ее особенной схеме имеется налицо это уменьшение потока Φ_b при увеличении скорости. Последнее является характерной особенностью машины Розенберга.

Для выяснения указанного свойства этой машины вернемся к фиг. 265 и предположим, что якорь этой машины делает n оборотов в минуту.

Наведенная в обмотке якоря потоком Φ_a э. д. с. E_b вызовет

в обмотке якоря ток I_b; последний послужит причиной появления потока возбуждения Φ_b, создаваемого обмоткой якоря. Мы можем написать:

$$\Phi_b \equiv I_b \equiv E_b \equiv \Phi_a \cdot n; \quad (117,1)$$

кроме того,

$$E_a \equiv \Phi_b \cdot n. \quad (117,2)$$

Так как согласно предыдущему $\Phi_b \equiv \Phi_a \cdot n$, то

$$E_a \equiv (\Phi_a \cdot n)\, n = \Phi_a \cdot n^2. \quad (117,3)$$

Теперь посмотрим, как изменяется поток Φ_a при изменении числа оборотов в минуту n.

Этот поток создается (фиг. 268) разностью ампервитков AW — от катушек B и B, сидящих на полюсах, и ампервитков якоря IW_a.

Таким образом мы имеем

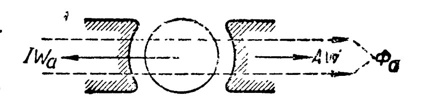
$$\Phi_a \equiv AW - IW_a.$$

В силу этого формула (117,3) примет следующий вид:

$$E_a \equiv (AW - IW_a) n^2.$$

Теперь найдем ток I во внешней цепи машины.

Предполагая, что сопротивление внешней цепи постоянно, мы можем написать



Фиг. 268.

$$I = C \cdot E_a,$$

где C — некоторая постоянная величина (по величине равная электрической проводимости цепи, в которую включен якорь). Отсюда следует, что

$$I = C[(AW - IW_a)n^2] = C \cdot AW \cdot n^2 - C \cdot IW_a \cdot n^2,$$

откуда

$$I = \frac{C \cdot AW \cdot n^2}{1 + C \cdot W_a \cdot n^2} = \frac{C \cdot AW}{\frac{1}{n^2} + CW_a}. \quad (117,4)$$

Это есть выражение для тока I, текущего во внешней цепи машины Розенберга.

В это выражение входит лишь одна переменная величина — число оборотов в минуту n.

Исследуя полученное выражение, мы видим, что при увеличении n ток I асимптотически приближается к некоторой постоянной величине.

Последнюю величину мы можем найти, подставляя в предыдущее уравнение значание $n=\infty$. Действительно,

$$I=\frac{C\cdot AW}{\left(\frac{1}{\infty}\right)^2+CW_a}=\frac{AW}{W_a}.$$

Таким образом ток I этой машины не возрастает непрерывно с возрастанием скорости, а стремится к некоторой конечной величине.

Построив уравнение (117,4) по точкам, мы получим кривую, показанную на фиг. 269. Исследуя эту кривую, мы видим, что, начиная с некоторой скорости, ток машины I остается практически неизменным, несмотря на изменение числа оборотов машины в широких пределах.

Машины со смещенными щетками. Автору настоящей книги удалось добиться почти такой же характеристики, как в машине Розенберга, также для обычной машины постоянного тока. Как оказалось, для этого необходимо:

1. Питать обмотку возбуждения от независимого источника.
2. Сдвинуть щетки на некоторый угол α относительно нейтральной оси по направлению вращения машины.

Для выяснения свойств такой машины рассмотрим фиг. 270. Мы видим, что при этих условиях поток возбуждения Φ_b вызывается разностью ампервитков обмотки полюсов и ампервитков реакции якоря, таким образом, мы можем написать

$$\Phi_b=C(AW_b-IW_r),$$

где C — некоторая постоянная величина, AW_b — ампервитки полюсов, IW_r — ампервитки реакции якоря.

Напряжение у клемм (пренебрегая падением напряжения) получим

$$U\approx E\equiv n\cdot\Phi_b.$$

Ток может быть выражен

$$I=C_2E=C_2\cdot n\cdot\Phi_b,$$

где C_2 — некоторая константа.

Подставляя сюда значение Φ_b, получим

$$I=C_1\cdot C_2\cdot n\,(AW_b-IW_r).$$

Решая это уравнение относительно I, найдем

$$I=\frac{C_1C_2\cdot n\cdot AW_b}{1+C_1\,C_2\cdot n\cdot W_2}=\frac{C_3\cdot n\cdot AW_b}{1+C_3\cdot n\cdot W_r},$$

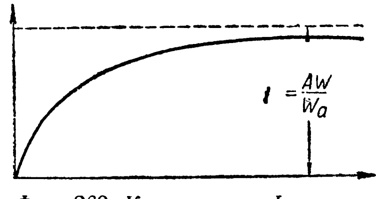
или, деля числитель и знаменатель на n, получим окончательно

$$I = \frac{C_3 \cdot AW_b}{\frac{1}{n} + C_3 W_r}. \qquad (117,5)$$

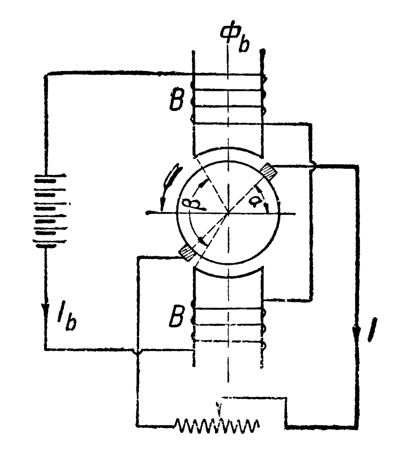
Мы видим, что, как и в машине Розенберга, ток асимптотически здесь также стремится к величине

$$I_\infty = \frac{C_3 \cdot AW_b}{\frac{1}{\infty} + C_3 W_r} \approx \frac{AW_b}{W_r}.$$

Таким образом в этой машине со смещенными щетками, начиная с некоторого числа оборотов n, мы имеем практически неизменяющийся ток.



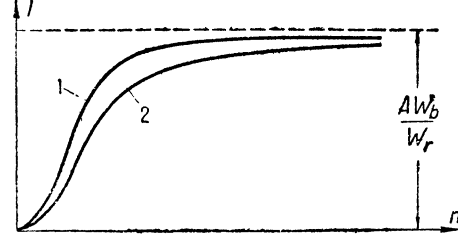
Фиг 269. Кривая тока I машины Розенберга в функции скорости машины.



Фиг. 270. Машина со смещенными щетками.

Сравнивая, однако, характеристику этой машины с характеристикой машины Розенберга, мы видим, что, характеристика последней в смысле колебания величины тока является более совершенной (фиг. 271).

Причину этого нетрудно уяснить; сравнивая между собой уравнения (117,4) и (117,5) этой главы, мы видим, что число оборотов n в первом выражении фигурирует в виде n^2, а во втором оно входит только в первой степени: n; поэтому кривая *1* на фиг. 271 быстрее приближается к своей асимптоте, чем кривая *2*.



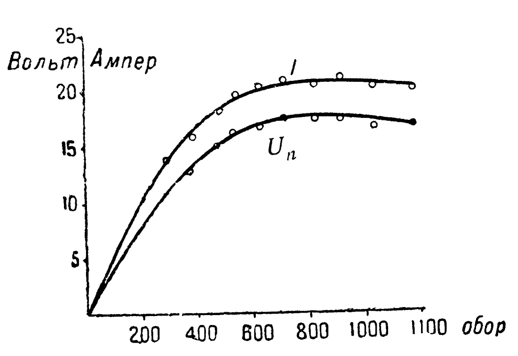
Фиг. 271. Кривая зависимости $I = f(n)$ для машины Розенберга и машины со смещенными щетками.

Последнее свойство машины со смещенными щетками является некоторым ее недостатком; зато эта машина имеет более простую конструкцию по сравнению с машиной Розенберга.

Для проверки высказанных здесь положений автором были проделаны опыты с шунтовой динамомашиной Ламайера на 5 *л. с.*, 120 V, 160/1 200 об/мин;[1] ток независимого возбуждения был уста-

[1] См. журнал „Электричество" № 4, 1916, К. И. Шенфер, Об одном свойстве динамомашины со смещенными щетками.

новлен $I_b = 0,5$ А, щетки динамомашины были смещены на 45° (электрических) по направлению вращения; на фиг. 272 приведены кривые тока I и напряжения у зажимов динамомашины U в зависимости от числа оборотов, полученных из опыта; из кривых этих видно, что, начиная примерно с 700 об/мин, испытуемая машина начала давать практически неизменный ток. Искрение щеток при опыте было незначительным благодаря большому переходному сопротивлению щеток.

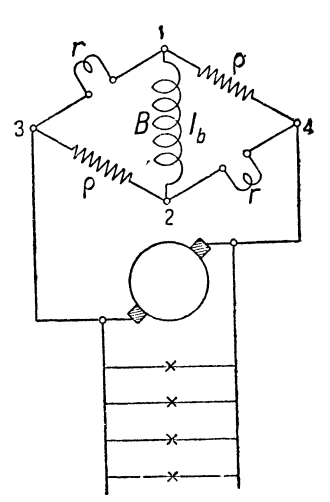


Фиг. 272. Кривые напряжения U_n и тока I машины со смещенными щетками.

Машину со смещенными щетками можно еще значительнее упростить, исключив аккумуляторную батарею (фиг. 270) и питая обмотку возбуждения от щеток самой машины, как это показано на фиг. 273.[1]

Из этой фигуры мы видим, что обмотка возбуждения B машины включается в диагональ мостика Уитстона. Плечи мостика составляются из двух обычных (например, манганиновых) сопротивлений ρ и ρ и двух железоводородных сопротивлений r и r.

Как известно, железоводородные сопротивления, образованные обычно из железной проволоки, впаянной в колбу, наполненную водородом, имеют свойство, начиная с некоторой величины тока, сильно увеличивать свое сопротивление при дальнейшем возрастании этого тока.



Фиг. 273. Включение обмотки возбуждения B в диагональ моста Уитстона.

В нашей машине согласно фиг. 273 получается при изменении скорости следующее:

Напряжение машины при увеличении числа оборотов немного увеличивается; ток, проходящий по сопротивлению ρ и ρ мостика, при этом также увеличивается, что влечет за собой значительное увеличение сопротивления железоводородных сопротивлений r и r, а последнее служит причиной уменьшения тока I_b, текущего в мосте, т. е. в электромагнитах возбуждения B.

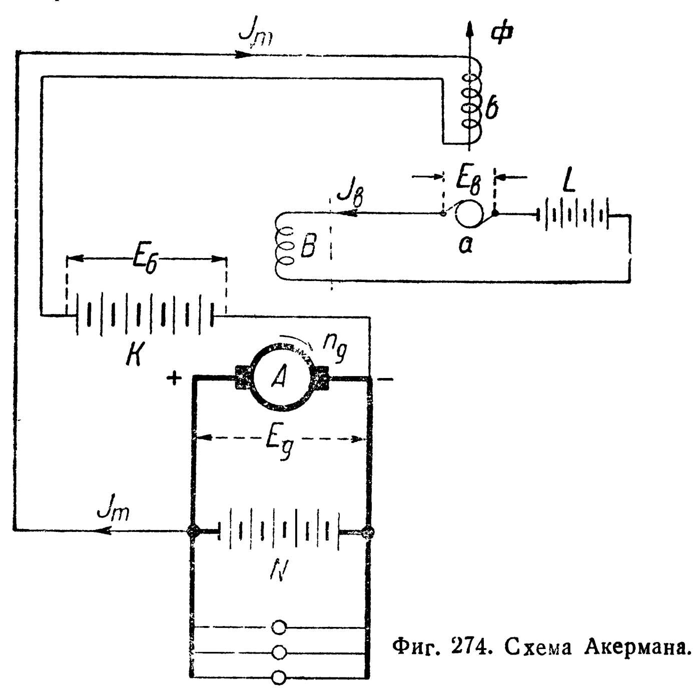
---

[1] Такую же схему питания обмотки электромагнитов для динамомашины системы Розенберга применяет фирма Electric Storage Battery Co Philadelphia (см. „Вестник инженеров“ № 19, 1915, инж. Д. И. Виноградов).

§ 118. Схема для освещения железнодорожных поездов по системе Акермана (с «двигателем-регулятором»). [1] Весьма оригинальную и в то же время совершенную схему для освещения поездов предложил шведский инженер Акерман.

Основные черты новой схемы можно уяснить из фиг. 274, на которой: *A* и *B*—якорь и обмотка возбуждения осветительного генератора, приводимого во вращение от оси вагона с разной скоростью;

L и *N*—батареи;



Фиг. 274. Схема Акермана.

K— батарея, включенная в цепь обмотки возбуждения *b* таким образом, что ее э. д. с. $E_б$ направлена противоположно напряжению генератора E_g;

a и *b*— якорь и обмотка возбуждения небольшой вспомогательной машины, ни с чем не сцепленной и вращающейся вхолостую в качестве двигателя постоянного тока (так называемый „двигатель-регулятор").

Своеобразие схемы фиг. 274 обусловлено тем, что в цепь обмотки возбуждения *B* осветительного генератора здесь включены не только батарея *L*, но, кроме того, еще якорь *a* небольшого моторчика постоянного тока; последний не сцеплен ни с какой другой машиной и в с е в р е м я в р а щ а е т с я в х о л о с т у ю!

Мощность этого моторчика *ab* обычно весьма невелика — несколько десятков ватт.

---

[1] См. Е. и. М. № 37, 1929.

Этот моторчик играет здесь роль регулятора тока возбуждения I_b, благодаря действию которого напряжение генератора, несмотря на изменения его числа оборотов в минут n_g в широких пределах, продолжает оставаться почти постоянным.

Для выяснения роли „двигателя-регулятора" *ab* напишем несколько соотношений.

Обращаясь к цепи обмотки возбуждения *b* мы видим, что ток возбуждения I_m здесь вызывается разностью э. д. с. $E_б$ батареи и напряжения якоря E_g, т. е. мы можем написать

$$I_m = \frac{E_g - E_б}{r}, \qquad (118,1)$$

где *r*—общее сопротивление цепи обмотки возбуждения *b*.

Найдем выражение для крутящего момента *M* „моторчика-регулятора" *ab*; мы можем написать

$$M \equiv \Phi \cdot I_b,$$

где Φ — магнитный поток, создаваемый обмоткой *b*, и I_b — ток якоря *a* (он же ток возбуждения машины *A*). Предполагая, что моторчик-регулятор все время вращается вхолостую, преодолевая только сопротивления холостого хода (трение в подшипниках и на коллекторе, гистерезис и токи Фуко), которые все время остаются более или менее постоянными, можно написать

$$M \equiv \Phi \cdot I_b \approx \text{const},$$

откуда

$$I_b \approx \frac{\text{const}}{\Phi}.$$

Так как магнитный поток Φ вызывается током I_m, то мы можем приближенно написать

$$I_b \approx \frac{\text{const}}{I_m}. \qquad (118,2)$$

Постараемся теперь ответить на вопрос, как будет изменяться ток возбуждения I_b при изменении скорости осветительного генератора *AB* (например, при возрастании его скорости n_g)?

При возрастании скорости n_g произойдет увеличение (небольшое) напряжения E_g, что повлечет за собой согласно уравнению (118,1) возрастание тока возбуждения I_m моторчика-регулятора.

В результате увеличения I_m согласно уравнению (118,2), куда I_m входит в знаменатель, ток возбуждения I_b главной машины уменьшится.

Таким образом из этих рассуждений явствует, что при увеличении скорости осветительного генератора будет происходить соответственное уменьшение тока возбуждения I_b, в результате чего напряжение машины E_g будет изменяться очень мало, практически оставаясь почти постоянным.

ГЛАВА СЕМНАДЦАТАЯ

ВЫСОКОВОЛЬТНЫЕ МАШИНЫ ПОСТОЯННОГО ТОКА

§ 119. Введение. Главная область применения высоковольтных машин постоянного тока — это мощные катодные лампы передаточных радиостанций, для питания анодных цепей которых применяется постоянный ток высокого напряжения, разные электрохимические установки, электрические фильтры и т. п.

За последнее время в области построения высоковольтных машин постоянного тока достигнуты значительные успехи. В качестве примера здесь можно указать на машины завода AEG на 10 000 V[1] и машины GEC на 12 000 V.[2]

Имеются указания в литературе и на машины более высоких напряжений (30 kV и выше).[3]

Развитие высоковольтных машин в сторону дальнейшего повышения напряжения на коллекторе ставит ряд задач из области высоковольтной изоляционной техники, связанных с разработкой новых и лучших способов изоляции машины.

Также чрезвычайно важным является вопрос о конструировании высоковольтного коллектора, который является наиболее ответственной частью высоковольтной машины.

§ 120. Выбор числа пазов. Во избежание больших периодических колебаний напряжения на коллекторе число пазов, приходящееся на полюсное деление, должно быть достаточно большим, и кроме того, это число пазов, приходящееся на пару полюсов, должно быть обязательно числом нечетным.

Основательность последнего требования поясняют две потенциальных диаграммы (фиг. 275a и b), из которых левая относится к случаю четного числа пазов на полюсное деление, а правая — к нечетному.

На фиг. 275 число сторон многоугольников равно числу пазов на пару полюсов, причем каждая сторона многоугольника дает суммарную э. д. с., индуктированную в пучке проводов, заложенных в один паз по величине и фазе. Конечно, такое геометрическое построение может быть допущено, строго говоря, только при условии наличности синусоидального распределения магнитной индукции в воздушном зазоре; так как на самом деле кривая магнитной индукции в воздушном зазоре машин постоянного тока имеет по большей части трапецоидальную форму, то такое геометрическое построение имеет лишь приближенный характер.

На левой диаграмме фиг. 275 напряжение на коллекторе по величине дается диаметральной соединительной линией многоугольника, например, линией *1-7*.

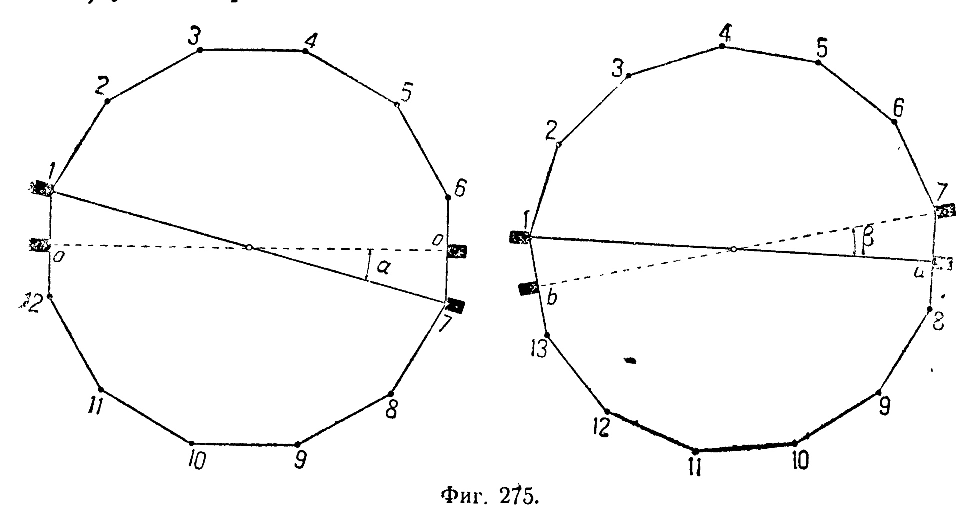
---

[1] „ETZ", 1915, стр. 549.
[2] I. A. E. E., т. 42, стр. 1041; „ETZ", 1924, стр. 532.
[3] „ETZ", № 36, 1927.

Рассматривая левую диаграмму, мы видим, что при вращении якоря напряжение на коллекторе будет колебаться в пределах *1-7* и *0-0*.

Таким образом мы видим, что в какой-нибудь момент времени напряжение на коллекторе измеряется отрезком диаграммы *1-7*, и после поворота якоря на угол α это напряжение падает до величины *0-0*.

Сравнивая на фиг. 275 с левой диаграммой правую, которая построена для случая нечетного числа пазов на пару полюсов, мы видим, что для последнего случая (т. е. нечетного числа пазов) условия работы машины получаются лучше: мы видим, что



Фиг. 275.

амплитуда колебаний напряжения на коллекторе здесь получается значительно ниже, при повороте якоря на угол β диаметральные линии *1a* и *b7* здесь равны друг другу. [1]

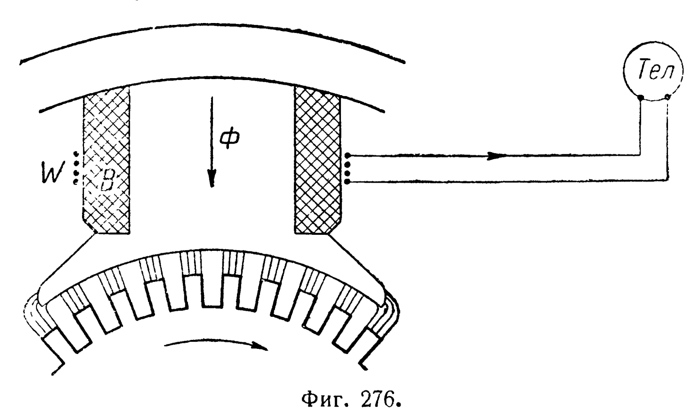
§ 121. Выбор числа полюсов. Не желая допускать величины разности потенциалов между смежными пластинами выше определенного предела (в среднем не выше по возможности 30 V), во избежание „кругового огня" на коллекторе еще недавно приходилось строить высоковольтные машины с малым числом полюсов (весьма часто в двухполюсном выполнении), что неблагоприятно отражалось на размерах машины.

В настоящее время, однако, благодаря улучшению условий коммутации и введению ряда описанных ниже усовершенствований, предохраняющих машину от „кругового" огня, допускаются большие разности потенциалов между смежными пластинами,

[1] Можно доказать, что при нечетном числе пазов на пару полюсов частота колебаний по сравнению с четным числом пазов увеличится в отношении $2\frac{Z \pm 1}{Z}$, где Z — число пазов на пару полюсов (см. Arnold, Gleichstrommaschine, т. I, стр. 201).

что дает возможность во многих случаях применять четырехполюсный тип машины.

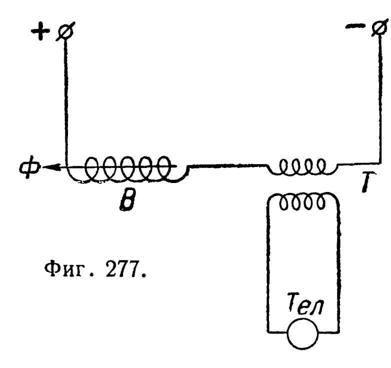
§ 122. Опытные методы обнаружения пульсаций магнитного потока машин. Колебания напряжения на коллекторе машины могут быть вызваны также колебанием величины потока возбуждения, обусловленного зубцами якоря.



Фиг. 276.

Для опытного исследования явлений колебания магнитного потока Ф, вызванного зубчатостью якоря, можно применять расположение, данное на фиг. 276.

Как видно из этой фигуры, поверх обмотки *B* полюса здесь расположено несколько витков *w* тонкой проволоки, соединенной с телефоном; колебания величины магнитного потока Ф при вращении якоря вызывают токи *i* соответственных частот в витках *w*, что можно обнаружить при помощи телефона.



Фиг. 277.

Другое расположение показано на фиг. 277; здесь телефон включен на вторичную обмотку небольшого трансформатора *T*, первичная обмотка которого включена в цепь обмотки электромагнитов возбуждения *B*.

При колебании потока возбуждения Ф в катушках *B* будет наводиться переменный ток, наличность которого можно обнаружить при помощи телефона.

§ 123. Средства для уменьшения пульсаций напряжения на коллекторе. Идеальным решением задачи в смысле ликвидации колебаний напряжения на коллекторе явилось бы применение совершенно гладкого якоря без пазов с равномерно распределенной якорной обмоткой, с достаточно большим числом коллекторных пластин.

В настоящее время, однако, почти исключительно применяются

якори с пазами. В таких машинах число пазов в якоре следует выбирать по возможности большим, причем число пазов, приходящихся на пару полюсов, как было отмечено выше, должно быть обязательно нечетным.

Такие же соображения, которые были высказаны выше по отношению к пазам, могут быть отнесены также и к коллекторным пластинам: число коллекторных пластин, приходящееся на один паз, должно быть по возможности числом нечетным.

При соблюдении последнего условия процессы перемещения и сбегания коллекторных пластин под положительной и отрицательной щетками будут протекать неодновременно, что будет способствовать улучшению условий хорошей коммутации.

Еще одно весьма радикальное средство для уничтожения пульсации напряжения на коллекторе заключается в придании пазам якоря скоса или в косом расположении краев полюсных наконечников.

§ 124. Коммутация в высоковольтных машинах. Несмотря на весьма малые значения линейной нагрузки якоря AS, допускаемые в высоковольтных машинах,[1] тем не менее, как общее правило, в таких машинах применяются дополнительные полюса.

Обмотка дополнительных полюсов, разумеется, должна здесь быть хорошо изолирована относительно корпуса при помощи миканитовых гильз.

Что касается щеток на коллекторе, то в высоковольтных машинах в качестве таковых применяются угольные щетки большой твердости с большим контактным сопротивлением.

В высоковольтных машинах постоянного тока, служащих для питания катодных ламп, обмотка дополнительных полюсов обычно делится на две части так, что половина катушек дополнительных полюсов включается перед отрицательной щеткой, а другая половина — перед положительной щеткой.

Такое расположение имеет целью защиту изоляции обмотки якоря от волн перенапряжений с крутым фронтом, причем в этом случае роль защитной самоиндукции играют катушки дополнительных полюсов.

§ 125. Затруднения коммутации в высоковольтных и быстроходных машинах. В высоковольтных машинах число витков w в якорных секциях приходится выбирать достаточно большим. Поэтому, как показывает выражение

$$e_r = 2w \cdot v \cdot AS \cdot \lambda \cdot l_i \cdot 10^{-8}, \qquad (125,1)$$

реактивное напряжение в таких машинах получается вообще большим.

В быстроходных машинах с большой окружной скоростью v, как видно из выражения (125,1), приходится иметь дело также с большим реактивным напряжением.

---

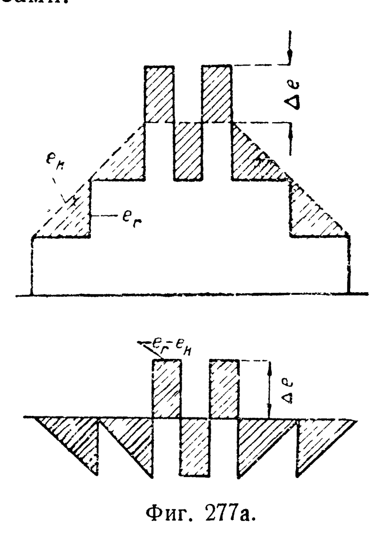
[1] В среднем для машин малой мощности допускаются значения AS от 70 до 100.

Большие значения реактивного напряжения e_r в таких машинах могут послужить причиной затруднения коммутации. На первый взгляд может показаться, что при помощи дополнительных полюсов можно без труда преодолеть все затруднения коммутации таких высоковольтных или быстроходных машин (путем уничтожения реактивного напряжения e_r, как бы высоко оно ни было).

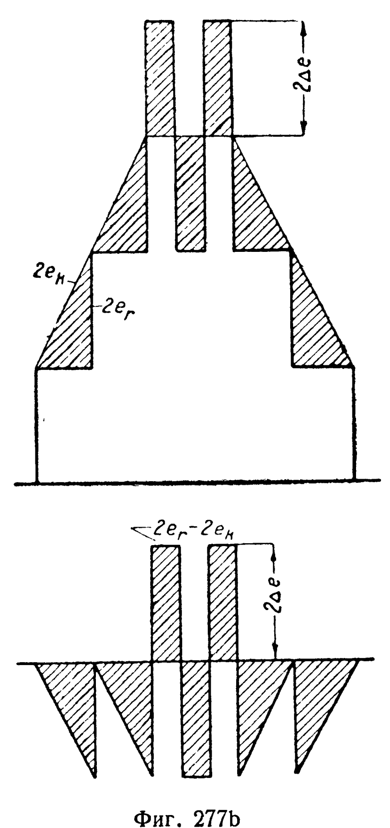
Однако более внимательное изучение этого вопроса доказывает ошибочность такой упрощенной точки зрения.

На фиг. 277а показана в виде примера ступенчатая кривая реактивного напряжения e_r.

На этой фигуре пунктиром показана кривая э.д.с. e_k, индуктированной дополнительными полюсами.



Фиг. 277а.



Фиг. 277b

Как видно из этой фигуры, остается при этом неукомпенсированная величина Δe, вызванная тем, что кривые e_r и e_k не совпадают по форме; на фиг. 277а для наглядности неукомпенсированные части заштрихованы.

На основании фиг. 277а можно написать.

$$e_r - e_k = \Delta e. \qquad (125,2)$$

Если скорость данной машины при прочих равных условиях повысится вдвое, то вместо прежней мы получим другую кривую, ординаты которой возрастут вдвое, как показано на фиг. 277b.

Для условий этой фигуры мы получим

$$2e_r - 2e_k = 2\Delta e. \qquad (125,3)$$

Последнее выражение показывает, что при повышении скорости машины, несмотря на наличие дополнительных полюсов, неукомпенсированная часть э.д.с. в короткозамкнутой секции возрастет вдвое. Отсюда видно, что при возрастании скорости машины при условии неизменной величины линейной нагрузки неукомпенсированная э. д. с. возрастает, что может вызвать искрение машины.

Так же, как повышение скорости, действует и повышение числа витков w в якорных секциях, обычное в высоковольтных машинах. Так, если при пересчете якоря данного типа машины на вдвое большее напряжение придется допустить в каждой секции двойное число витков w, то в известных случаях следует ожидать затруднений коммутации, вызванных удвоением величины реактивного напряжения.

Это неблагоприятное влияние возросшей величины неукомпенсированной э. д. с. Δe можно в значительной мере парализовать постановкой щеток с большим переходным сопротивлением. Отсюда понятно, почему рекомендуется в высоковольтных машинах брать твердые угольные или лучше электрографированные щетки с большим контактным сопротивлением.

Величина неукомпенсированной э. д. с. Δe в короткозамкнутых секциях может быть значительно уменьшена при помощи пазового демпфера, предложенного в свое время автором книги и затем Дрейфусом.

§ 126. Явление „кругового огня“ на коллекторе. Иногда при работе машины постоянного тока (особенно высоковольтной) наблюдается явление так называемого „кругового огня“ на коллекторе. Особенной мощности достигает этот „круговой огонь“ в высоковольтных машинах. Это явление по большей части наблюдается при резких колебаниях нагрузки („толчках тока“) машины, например, при работе двигателя, приводящего в движение прокатный стан, при работе трамвайных тяговых двигателей, при работе генератора на трамвайную сеть и т. п.

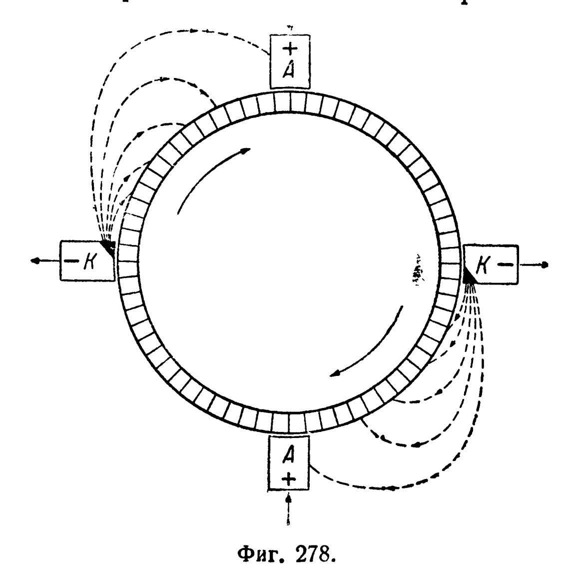
При круговом огне происходит образование вольтовой дуги по всему коллектору, в результате чего машина по большей части выбывает из строя.

На фиг. 278 схематически показаны пунктирными линиями возможные пути „кругового огня“ по коллектору; на этой фигуре K и K означает раскаленный сбегающий край отрицательной щетки, который выбрасывает в большом количестве электроны, ионизирующие пространство вокруг коллектора.

Как видно из фиг. 278, при указанном на чертеже направлении вращения коллектора и полярности щеток вольтова дуга может появиться только в левом верхнем и правом нижнем квадранте коллектора, так как для поддержания вольтовой дуги, как уже было подчеркнуто выше, необходимо, чтобы катод имел достаточно высокую температуру, что имеет место при замед-

ленной коммутации под сбегающим краем искрящих щеток; на фиг. 278 „раскаленный катод" — искрящий край отрицательных щеток — показан в точках *K* и *K* в виде заштрихованного треугольника. Стрелками на фиг. 278 схематически показано направление перемещения электронов, которые несутся от горячего катода *K* к аноду *A* (направление тока вольтовой дуги должно быть обратное).

Те явления „кругового огня" на коллекторе машины, которыми часто сопровождаются короткие замыкания или резкие толчкообразные изменения нагрузки, протекают настолько быстро, что простое наблюдение невооруженным глазом не может дать всей картины явлений.



Фиг. 278.

А. Кон произвел ряд кинематографических снимков коллектора генератора в момент короткого замыкания, когда на коллекторе его появлялся „круговой огонь".[1]

Из опытов выяснилось, что вольтова дуга по коллектору распространяется от щеток одной полярности к щеткам противоположной полярности со скоростью приблизительно вдвое меньшей, чем окружная скорость коллектора.

Полученный здесь из опытов очень важный результат дает указания относительно тех требований, которые должны быть предъявлены быстродействующему выключателю цепи якоря машины. Для защиты машины при коротком замыкании быстродействующий выключатель должен отключать якорь машины раньше, чем вольтова дуга успеет переброситься от щеток одной полярности к щеткам противоположной полярности.

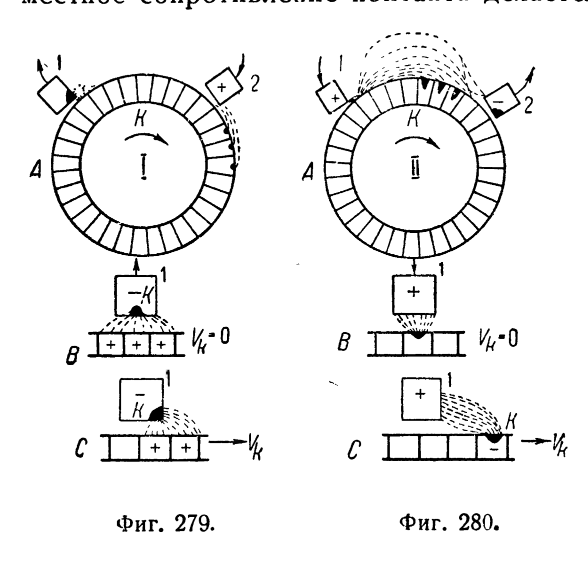
Обычно для надежности к быстродействующему выключателю выставляется требование, чтобы он отключал машину в промежуток времени равный тому, в течение которого коллекторная пластина машины проходит путь по коллектору между щетками противоположной полярности.

§ 127. Картина возникновения „кругового огня". Возникновение „кругового огня" протекает обычно следующим порядком. При коротком замыкании вследствие ухудшения условий коммутации края щеток начинают сильно искрить и раскаливаться.

---

[1] См. AEG-Mitt. № 2, 1930; „ETZ", 1927, стр. 1441.

При этом в случае достаточно большой силы тока короткого замыкания происходит местный перегрев какой-нибудь небольшой части контактной поверхности щетки. Так как угольная щетка имеет отрицательный температурный коэфициент, то в этом месте перегретого контакта сопротивление падает, что влечет за собой увеличение здесь плотности тока и соответственно дальнейшее увеличение нагрева. Последнее служит причиной дальнейшего уменьшения контактного сопротивления в этом месте и влечет за собой дальнейшее возрастание местной плотности тока. В конце концов при больших перегрузках местное сопротивление контакта делается настолько малым, что через этот контакт устремляется почти весь ток щетки.



Фиг. 279. Фиг. 280.

Для пояснения сказанного (фиг. 279, *B*) показана угольная щетка, утрированно приподнятая над коллектором, причем линиями показаны примерные пути тока, текущего из коллектора в щетку. Благодаря местному перегреву на поверхности контакта щетки образуется так называемое „катодное пятно", показанное на фиг. 279, *B* в виде черного пятнышка.

Это катодное пятно в большом количестве выбрасывает электроны, ионизируя окружающее пространство. Если щетка машины имеет отрицательный потенциал, как показано на фиг. 279, *B*, то катодное пятно образуется на самой щетке.

Движется ли коллектор или стоит неподвижно, катодное пятно все время остается на щетке, лишь слегка изменяя свое положение на поверхности контакта при вращении коллектора (фиг. 279).

Совершенно по-другому протекают явления на щетке положительной полярности при коротком замыкании.

В последнем случае катодное пятно обычно образуется не на щетке, а на коллекторе (фиг. 280,*B*).

При коротком замыкании машины и сильном перегреве катодное пятно, образовавшееся на какой-либо одной из пластин коллектора, держится на пластине довольно устойчиво и перемещается в пространстве при вращении коллектора (фиг. 280, *C*).

Опыты проф. О. Брона и инж. В. Александрова. Проф. О. Б. Брон и инж. В. Александров в Бюро исследований Харьковского электромашиностроительного завода исследовали

физические процессы, происходящие на коллекторе при так называемом „круговом огне“.[1]

Эти авторы задались целью экспериментального нахождения скорости распространения вольтовой дуги по коллектору при „круговом огне“.

Относительно скорости распространения „кругового огня“ по коллектору раньше существовали противоречивые представления. В одних работах (например, Cohna[2]) высказывалось предположение, что скорость распространения „кругового огня“ приблизительно равна половине окружной скорости коллектора.

Инж. А. И. Москвитин на основании своих работ утверждал, что скорость распространения вольтовой дуги равна окружной скорости коллектора.

Такие противоречивые утверждения не дают возможности установить, какие требования следует предъявлять к быстродействующим выключателям.

Обширные опыты, произведенные проф. Броном на ХЭМЗ при помощи разработанной им аппаратуры, позволяющей снимать фотографию вольтовой дуги через весьма малые промежутки времени, привели к совершенно новой картине процесса распространения вольтовой дуги на коллекторе при авариях.

Самым замечательным оказалось то, что скорость движения кратера вольтовой дуги по коллектору во много раз превосходит скорость коллектора.

Причину такого быстрого распространения вольтовой дуги проф. О. Брон объясняет теми большими электродинамическими силами, которые стремятся растянуть вольтову дугу, вследствие чего получается весьма быстрое движение основания вольтовой дуги на коллекторе.

§ 128. **Влияние полярности щеток.** После сказанного здесь станет понятной разница в поведении положительной и отрицательной щеток машины при перегрузках и коротких замыканиях.

Обратимся к фиг. 280, *С*, где показана щетка положительной полярности.

Как поясняет эта фигура, при вращении коллектора, когда раскаленное катодное пятно, образованное на коллекторной пластине, выйдет из-под щетки, вольтова дуга начнет растягиваться и увлекаться по коллектору, следуя за перемещающимся катодным пятном. Когда катодное пятно при перемещении коллектора начнет приближаться к щетке противоположной полярности, вольтова дуга перебросится по всему коллектору и замкнет через себя на короткое весь коллектор (фиг. 280, *А*).

Если на коллекторе машины расположено половинное число щеточных болтов (при последовательной обмотке якоря), то в отношении опасности появления „кругового огня“ направление вращения якоря может оказать известное влияние.

Сравнивая верхние чертежи фиг. 279 и 280 между собой, мы ви-

---

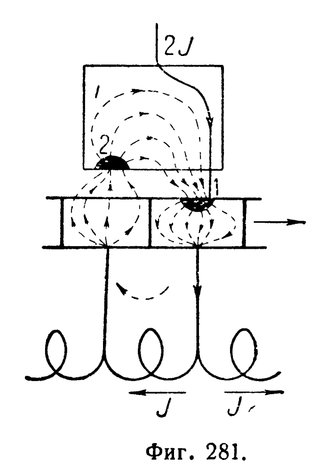
[1] См. „Электричество“ № 3, 1935.

[2] AEG-Mitt, 1930, стр. 130.

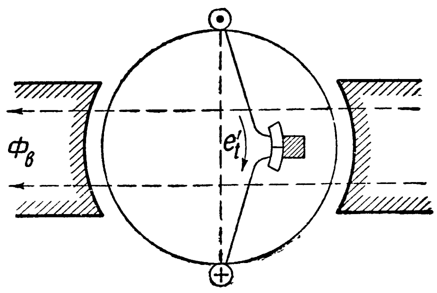
дим, что при условиях чертежа фиг. 280 можно ожидать более частого появления „кругового огня“, чем при условиях чертежа фиг. 279, так как в случае фиг. 280 для вольтовой дуги представляется более короткий путь в верхнем квадранте коллектора.

Таким образом на первый взгляд может показаться, что работе машины согласно фиг. 279 должно быть отдано предпочтение и что, например, тяговые двигатели, имеющие обычно половинное число щеток, должны быть соединены таким образом, чтобы их нормальная работа совершалась согласно схеме фиг. 279.

Однако необходимо сказать, что при достаточно суровом коротком замыкании вольтова дуга все же может переброситься между щетками верхнего квадранта также и при соединении машины по схеме фиг. 279. Почему это может произойти, дает объяснение фиг. 281. Здесь изображена секция якоря ма-



Фиг. 281.



Фиг. 282. Наведение в короткозамкнутой секции э. д. с. e_t изменяющимся потоком возбуждения.

шины постоянного тока, находящейся в состоянии короткого замыкания.

При сильном коротком замыкании машины благодаря влиянию магнитного насыщения и магнитного рассеяния дополнительные полюса уже не в состоянии целиком компенсировать реактивное напряжение в короткозамкнутых секциях. Благодаря этому в короткозамкнутой секции появляется весьма большой местный добавочный ток i, замыкающийся поперек щетки (фиг. 281).

При малых значениях этого тока i последний влечет за собой только неравномерное распределение плотности тока в контакте.

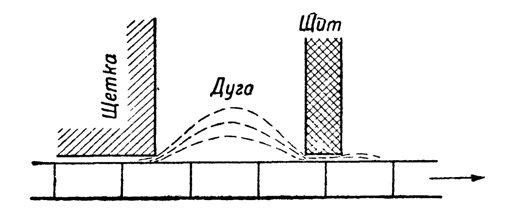
При больших значениях добавочного тока i может произойти под одним из краев щетки изменение направления тока. Из фиг. 281, которая иллюстрирует этот случай, видно, что под левым краем щетки ток здесь имеет направление, противоположное по сравнению с правым краем. При этих условиях могут появиться вместо одного два катодных пятна: одно на коллекторной пластине *1*, другое — на контактной поверхности щетки *2*, как показано на фиг. 281.

В этом случае разница в поведении положительных и отрицательных щеток при коротких замыканиях почти исчезает

и вольтова дуга может переброситься между всеми квадрантами поверхности коллектора, в том числе и в верхнем квадранте на фиг. 279.

При толчках тока умеренной силы все же схеме фиг. 279 должно быть отдано известное предпочтение.

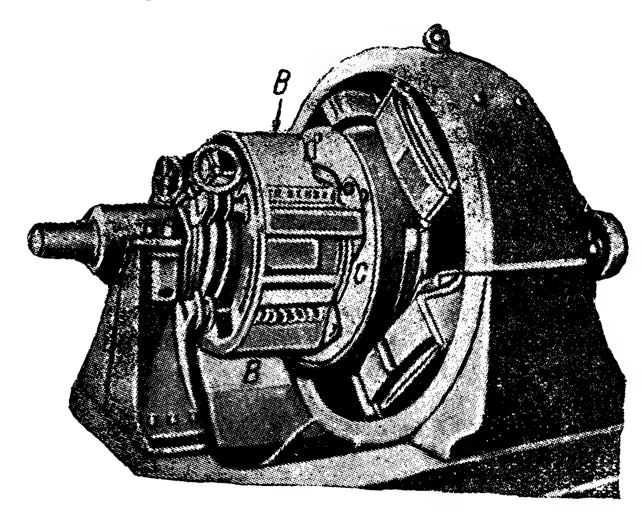
§ 129. Защита от „кругового огня“. Для того чтобы защитить машину от „кругового огня“, часто применяются специальные перегородки (фиг. 283), которые располагаются между разноименными щетками таким образом, что механически преграждают путь



Фиг. 283. Щит для тушения вольтовой дуги на коллекторе.

Фиг. 284. Коллектор с перегородками *B*, *B*, *B*, *B*.

вольтовой дуге, образовавшейся на коллекторе. На фиг. 284 схематически изображен коллектор с четырьмя такими перегородками *B*. Эти перегородки обычно делаются из какого-нибудь огнеупорного изолирующего материала.



Фиг. 285.

На фиг. 285 изображена высоковольтная машина, снабженная перегородками *B* и *B* и, кроме того, имеющая еще щит *C*, преграждающий путь вольтовой дуге с коллектора к обмотке якоря.

Устранение „кругового огня". Эти методы (чисто механического преграждения пути вольтовой дуги) вносят известное усложнение в конструкцию машины и не всегда достигают своей цели.

Поэтому правильнее проектировать всякую машину таким образом, чтобы коллектор машины не обладал наклонностью к образованию „кругового огня".

Для этой цели согласно предыдущему следует таким образом выбирать размеры машины, чтобы максимальная разность потенциалов между смежными коллекторными пластинами при наибольшей нагрузке не превышала известного предела.

Согласно данным Ламме[1] максимальная величина разности потенциалов между смежными пластинами e_{max} не должна превосходить при самых неблагоприятных условиях величины 28 V.

Проф. Рихтер[2] дает следующие значения:

Для малых машин	$e_{max} \leqslant 40-50$ V
„ машин средней мощности . . .	$e_{max} \leqslant 35$ „
„ „ большой „ . . .	$e_{max} \leqslant 25-30$ „

При машинах малой мощности омическое сопротивление обмотки якоря обычно бывает больше, чем сопротивление якоря больших машин на то же напряжение; поэтому в малых машинах мощность вольтовых дуг на коллекторе обычно бывает относительно невелика, вследствие чего эти вольтовы дуги здесь держатся менее устойчиво, чем в машинах большой мощности.

Этим объясняется, почему в машинах малой мощности можно допускать без вреда для коллектора большие значения разности потенциалов между смежными пластинами, чем в машинах большой мощности.

В тех случаях, когда машина большой мощности имеет толчкообразную нагрузку (например, двигатели для прокатных станов, трамвайные генераторы и т. п.), во избежание чрезмерного искажения формы кривой магнитной индукции в воздушном зазоре B_l и связанного с этим повышения величины e_{max} такие машины выполняются обычно с компенсационными обмотками для устранения деформации кривой B_l.

§ 130. Размеры коллектора. Современные тяговые двигатели часто имеют среднюю величину напряжения между смежными пластинами $e_{kcp} = 17$ V. При электрическом напряжении в таких машинах напряжение между смежными коллекторными пластинами кратковременно повышается до более высоких значений.

В высоковольтных машинах допускаемая величина предопределяет диаметр машины.

Так, например, для трамвайного двигателя на 650 V, задаваясь величиной $e_{kcp} = 17$ V и шириной коллекторного деления в 5 mm можно подсчитать диаметр коллектора $D_k = 244$ mm. Полагая, что диаметр якоря D из соображений удобства разме-

---

[1] См. Arnold „Gleichstrommaschine", т. I, изд. 1919, стр. 212.

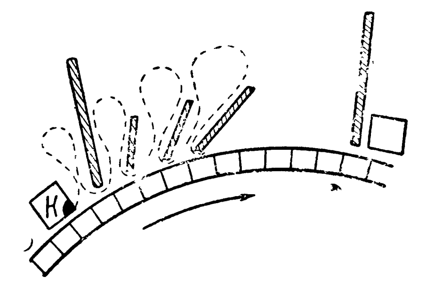
[2] Richter „Die Electrische Maschinen", т. I, стр. 376.

щения обмотки должен быть больше чем D_k примерно на 30 mm, найдем $D = 274$ mm.

Полученная величина соответствует в среднем размерам современных трамвайных двигателей.

§ 131. Методы борьбы с „круговым огнем“. Один из простых и эффективных методов борьбы с „круговым огнем“ состоит в следующем:

Располагая барьер из огнеупорного изолирующего вещества, можно преградить путь вольтовой дуге по коллектору, однако при высоких напряжениях эффективность этого метода все же не очень велика. Усилить действие таких барьеров можно, применяя расположение, показанное на фиг. 286.



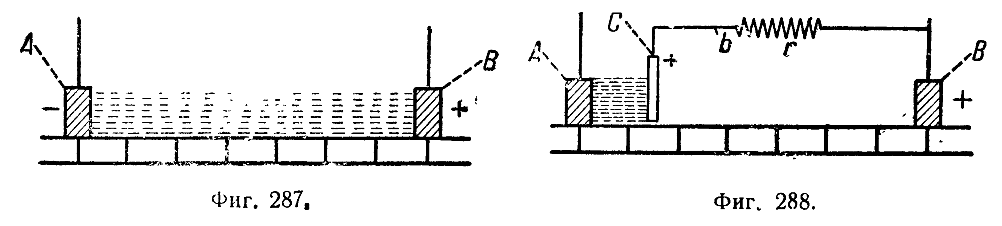
Фиг. 286.

На генераторах, питающих наш электрифицированный участок железной дороги Сурамского перевала, применен аналогичный способ защиты от „кругового огня“.

Как видно из фиг. 286, между щетками разной полярности генератора расположен ряд барьеров из изолирующего огнеупорного вещества.

Эти барьеры имеют разный наклон друг относительно друга.

Сделано это для того, чтобы газы и горячие пары, образовавшиеся в результате появления вольтовой дуги, двигаясь



Фиг. 287.　　Фиг. 288.

в радиальном направлении, расширялись, что должно повлечь за собой охлаждение и дейонизацию газов и, следовательно, тушение вольтовой дуги.

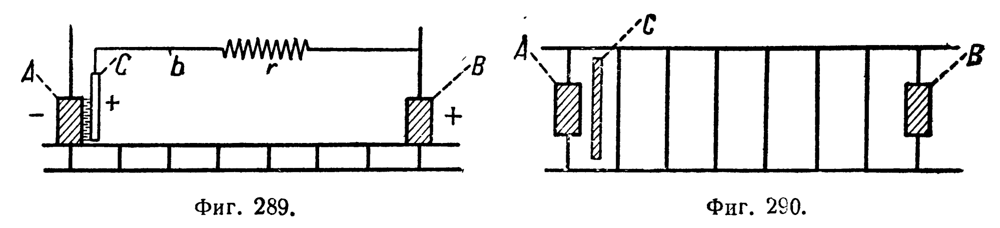
На фиг. 287 и 288 дано пояснение другого метода борьбы с „круговым огнем“, предлагаемого автором.

На фиг. 287 дана схематизированная картина электрического поля между щетками разной полярности, причем для упрощения на этой, равно как и на всех других фигурах, влияние потенциала коллекторных пластин не учитывается.

Если расположить между разноименными щетками A и B экран C из проводника или полупроводника, соединив последний посредством провода b и реостата r со щеткой B, то в пространстве над поверхностью коллектора между щеткой B и экраном C электрическое поле будет отсутствовать (если грубо

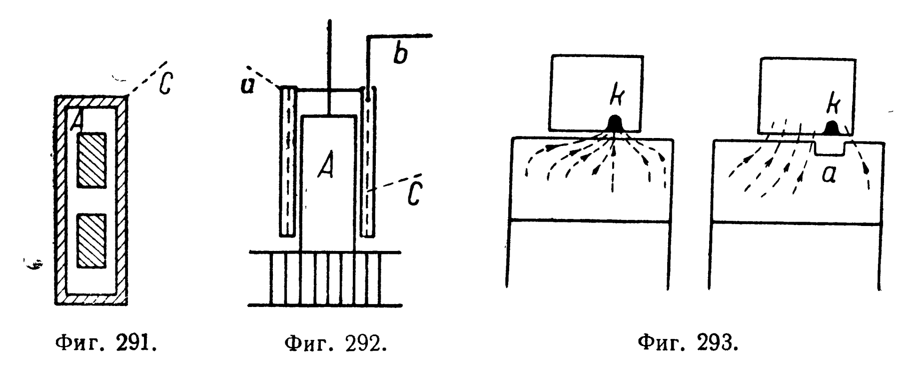
приближенно пренебречь влиянием потенциала коллекторных пластин). При расположении фиг. 288 электрическое поле на коллекторе между щеткой A и экраном C будет усилено.

Двигая постепенно экран C влево и приближая его к щетке A, мы придем, наконец, к расположению фиг. 289 и 290, когда экран C будет почти вплотную придвинут к щетке A, благодаря чему почти над всей поверхностью коллектора электрическое поле будет частично скомпенсировано.



Фиг. 289. Фиг. 290.

Выполняя экран в виде металлической коробки C, окружающей щетки, согласно фиг. 291, мы можем получить еще более совершенное экранирование щеток. При расположениях, показанных на фиг. 291, возможен пробой между щеткой A и экраном C, имеющих разные электрические потенциалы. Для умень-



Фиг. 291. Фиг. 292. Фиг. 293.

шения тока при пробое можно соединить экран C со щеткой B посредством сопротивления r. Можно совершенно избежать пробоя, если экран C окружить со всех сторон изолирующей оболочкой a, как показано на фиг. 292.

Экран C на фиг. 292 показан в виде металлической сетки, хотя возможен вариант в виде сплошной металлической ленты.

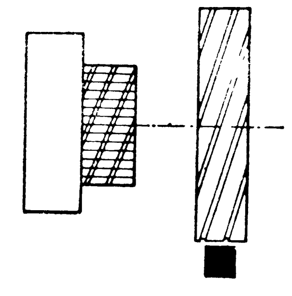
Ясно, что такой же описанный здесь принцип защиты от „кругового огня" возможен и при коллекторной машине переменного тока.

Опыты подтвердили высказанные выше предположения и практическую пригодность защиты по фиг. 293. [1]

[1] Опыты производились в электромашинной лаборатории ВЭИ инж. А. И. Москвитиным, которому автор здесь выражает глубокую благодарность. Инж. А. И. Москвитин предложил ряд своих методов „гашения" вольтовой дуги на коллекторе. Описание этих методов было дано А. И. Москвитиным в журнале „Электричество" за 1933 г.

В свое время была опубликована весьма интересная статья американского инженера Litle,[1] который производил наблюдение процессов, происходящих в рабочем контакте угольной щетки, работающей на медном кольце. Рассматривая такую щетку при перегрузке, получаем картину распределения тока в щеточном контакте в схематизированном виде, представленную на левом чертеже фиг. 293.

Как видно из этой фигуры, при сильном местном перегреве и образования катодного пятна на щетке почти весь ток из контактного кольца будет устремляться в одну точку щеточного контакта и будет сильно перегревать последний, вследствие чего неизбежно появится искрение.



Фиг. 294.

Причина такого явления концентрации тока в одной точке, кроющаяся в отрицательном температурном коэфициенте сопротивления угольного контакта, была освещена выше.

Если бы под катодным пятном какимлибо образом мы бы расположили небольшое углубление *a* на цилиндрической поверхности кольца, то вольтова дуга потухла бы в этом месте (см. правый чертеж фиг. 293).

Профрезовав на цилиндрической поверхности кольца ряд винтовых нарезок, как показано на фиг. 294 справа, мы увидим, что при вращении такого кольца впадины все время будут перемещаться под щеткой в осевом направлении, гася возникшие небольшие вольтовы дуги.

Таким образом можно думать, что угольная щетка на таком медном кольце с винтовыми нарезками будет работать без искрообразования даже при больших плотностях тока.

Хотя опыты и подтвердили высказанные предположения, однако этот метод еще не вышел, повидимому, из стадии предварительных экспериментальных разработок.

§ 132. Экран Якоби. С разрушительным действием „кругового огня“ на коллекторе в высоковольтных машинах до сих пор пытались бороться при помощи предохранительных изолирующих щитов или барьеров, которые пытались располагать таким образом, чтобы создать затруднения для распространения вольтовой дуги по коллектору.

Якоби предложил другое весьма оригинальное расположение предохранительных щитов; на фиг. 295 показано это новое расположение для двухполюсной машины.

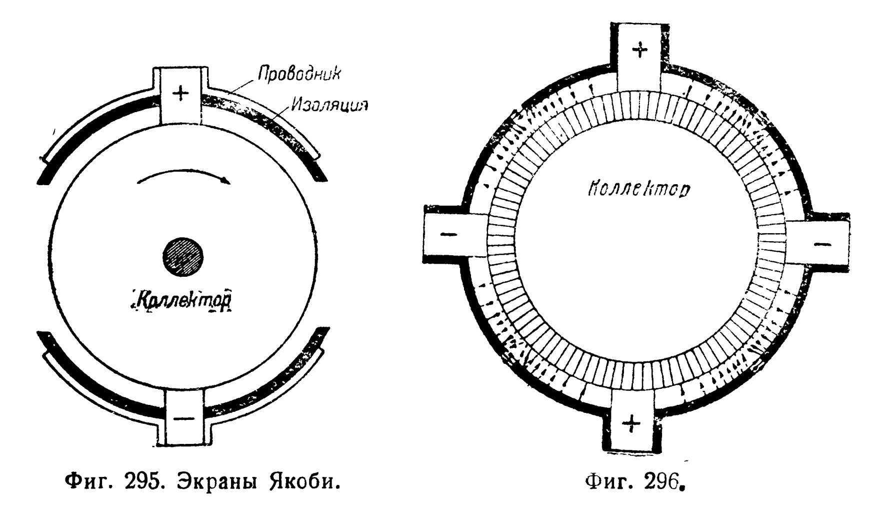
Как видно из фигуры, щиты в количестве двух имеют цилиндрическую форму и расположены коаксиально с коллектором.

Для того чтобы понять цель такого несколько необычного расположения, рассмотрим фиг. 297, на которой показан коллектор со щетками четырехполюсной машины; на этой фигуре

---

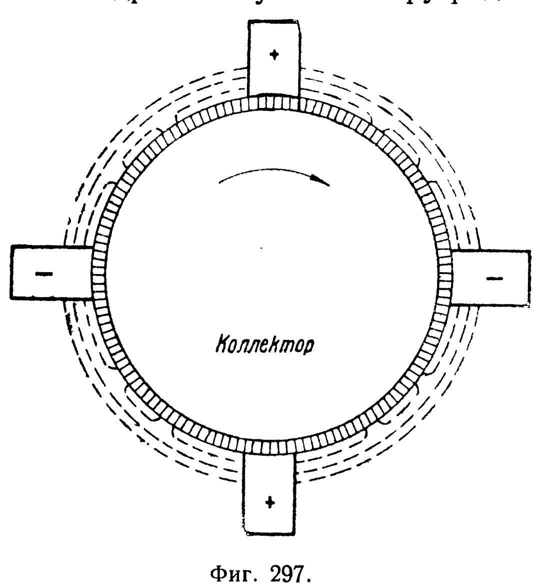
[1] См. Electical Engineering № 6, 1931.

также схематически показано направление линий электрических сил вокруг коллектора. Как видно из фиг. 298, линии электрических сил здесь протекают от точек высокого потенциала



Фиг. 295. Экраны Якоби. Фиг. 296.

к точкам низкого потенциала и образуют собой по отношению к цилиндрическому коллектору ряд концентрических кривых.



Фиг. 297.

При появлении „кругового огня" на коллекторе вдоль изображенных на фиг. 297 линий электрических сил будут двигаться электроны и ионы вольтовой дуги.

Если бы, однако, удалось изменить направление линий сил, направив их перпендикулярно к рабочей поверхности коллектора, явление пробоя по коллектору в виде кругового огня стало бы невозможным!

Вышеупомянутое радиальное расположение линий электрических сил можно получить путем расположения вокруг коллектора металлических экранов, электрически соединенных со щетками (фиг. 296).

На фиг. 296 показано схематически расположение линий электрических сил, которые теперь направлены нормально к рабочей поверхности коллектора.

Как видно из этой фигуры, теперь электроны могут перемещаться вдоль линий сил только в радиальных направлениях и не могут образовать электрического разряда между разноименными щетками.

Если покрыть изоляцией внутреннюю поверхность экранов фиг. 296, то при таких условиях вольтова дуга совершенно будет лишена возможности образоваться на коллекторе.

На фиг. 295 показаны два таких экрана с изолированной внутренней поверхностью для двухполюсной машины.

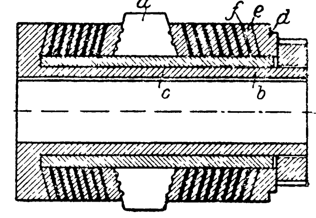
Произведенные опыты доказали пользу новой конструкции.

Кольцевые барьеры. В настоящее время было внесено весьма важное усовершенствование в высоковольтных машинах, заключающееся в новом своеобразном расположении изолирующих барьеров на коллекторе.

Для предохранения высоковольтной машины от „кругового огня" на коллекторе было предположено выполнять изолирующие барьеры в виде колец, расположенных коаксиально с коллектором и изолирующих друг от друга щетки разных полярностей. [1]

§ 133. Коллектор высоковольтных машин. Коллектор высоковольтных машин имеет чаще всего обычную конструкцию закрепления в виде ласточкина хвоста.

Завод GEC, однако, разработал для своих генераторов 12 kV своеобразную конструкцию, показанную на фиг. 298.



Фиг. 298.

Как видно из этой фигуры, коллекторные пластины здесь расположены на металлическом цилиндре *b*, будучи изолированы от последнего при помощи бумажного изолирующего цилиндра *c*.

Между нажимным кольцом *d* и коллекторными пластинами *a* расположен ряд слоев хлопчатой бумаги *e* с прослойками из миканита *f*, причем все спрессовано под большим давлением.

Собственно изоляцией здесь являются миканитовые прослойки, в то время как хлопчатобумажные прослойки, могущие слегка деформироваться при нагреве коллектора, служат для придания эластичной устойчивости всей системе.

Благодаря описанной здесь конструкции коллектора длина пути пробоя с коллекторных пластин на корпус получается весьма значительной, что повышает надежность работы высоковольтной машины. [2] Средняя разность потенциалов между сложными коллекторными пластинами для этой 12-kV машины допущена до 90 V.

§ 134. Изоляция высоковольтных машин постоянного тока. Обычно внутри паза изоляция относительно корпуса выполняется в виде спрессованного миканита.

---

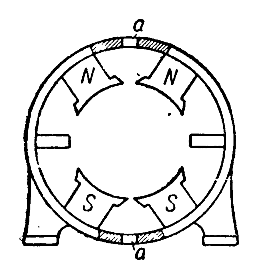
[1] См. Siemens-Jahrbuch, 1930, стр. 135. Такой же метод защиты в свое время был предложен проф. А. Н. Ларионовым.

[2] См. „ETZ", стр. 1287, 1927.

Насколько велик относительный объем изоляции в пазу высоковольтной машины, показывают данные одной высоковольтной машины на 12000 V и 1 A, для которой коэфициент заполнения паза оказался равным всего на всего

$$\frac{\text{сечение меди}}{\text{сечение паза}} = 0{,}035 = 3{,}5\%^{1}.$$

Изоляция в пазах высоковольтной машины требует весьма тщательного изготовления и большого опыта.

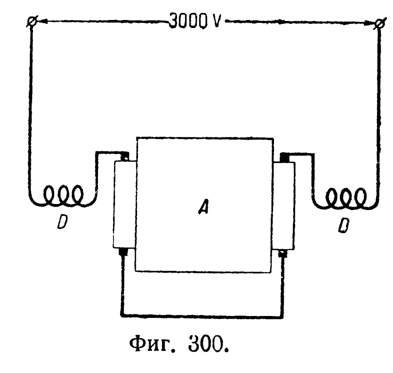


Фиг. 299.

Что касается изоляции торцевых частей обмотки, то здесь конструктивные затруднения обычно бывают относительно легче преодолимы: относительно корпуса торцевые части обмотки якоря обычно изолируются при помощи бакелитовых цилиндров.

Толщина миканитовой изоляции между коллекторными пластинами высоковольтных машин обычно колеблется между 1,5 и 2,5 mm и выше, причем последнее значение относится к случаю больших разностей потенциалов между смежными пластинами, достигающих в настоящее время иногда 250 V и выше. [2]

Соединение секций якорей обмотки с коллекторными пластинами обычно производится посредством кусков хорошо изолированного кабеля относительно большого сечения; такая конструкция применяется, главным образом, для придания большей механической крепости обмотке, все части которой должны достаточно хорошо сопротивляться механическим нагрузкам от центробежных сил.



Фиг. 300.

§ 135. Магнитная система высоковольтных машин. Для уменьшения влияния „скашивающих" ампервитков реакции якоря на магнитное поле машины иногда применяется конструкция полюсов, показанная на фиг. 299.

Как видно из фиг. 299, здесь каждый полюс разделен на два частичных полюса; таким образом на фиг. 299 изображена не четырехполюсная, но двухполюсная машина.

При таком расположении силовые линии реакции якоря здесь принуждены замыкаться по более длинным путям по сравнению с обычными машинами. Для того чтобы затруднить образование поля реакции якоря в еще большей степени, служат два прореза в станине *a* и *a*, показанные на фиг. 299.

---

[1] См. „ETZ" № 42, 1928.
[2] См. „ETZ" № 42, 1928.

§ 136. Примеры выполненных высоковольтных машин. Показанная на фиг. 299 магнитная система была применена для генератора мощностью в 3 kW, 3 000 V, 1 500 об/мин для радиостанции постройки одного шведского завода в г. Фалуне (Швеция).

На фиг. 300 показана схема соединения этого генератора. Конструкция его полюсов выполнена согласно фиг. 299.

В якоре расположены две независимых обмотки с двумя коллекторами. Пазы и якори имеют косое расположение. Число пазов — 33. Число коллекторных пластин на каждом коллекторе — 165.

Возбуждение — независимое (от 440 V сети). Обмотка дополнительных полюсов D и D разделена здесь на две части. О цели такого расположения сказано выше.

ГЛАВА ВОСЕМНАДЦАТАЯ

ДВИГАТЕЛИ ПОСТОЯННОГО ТОКА

В зависимости от способа присоединения обмоток возбуждения к обмотке якоря в настоящее время различаются следующие типы двигателей постоянного тока:

1. Двигатели последовательного возбуждения (или сериесные двигатели), у которых обмотка электромагнитов соединена последовательно с якорем.

2. Двигатели шунтового возбуждения, у которых обмотка электромагнитов приключена к якорю параллельно.

3. Двигатели смешанного (или компаундного) возбуждения, имеющие две обмотки, расположенные на общих сердечниках электромагнитов; одну обмотку шунтовую и другую — сериесную; в зависимости от направления витков последней различают двигатели „компаундного" и „противокомпаундного" соединения.

§ 137. Движение проводника, обтекаемого током, в равномерном магнитном поле. Если поместить прямолинейный проводник, обтекаемый током i_a, в магнитное поле, создаваемое полюсами N и S, то, как известно, этот проводник начнет двигаться (фиг. 301).[1] Направление перемещения этого проводника можно найти, применяя хорошо известное из элементарного курса электротехники правило левой руки. Это правило может быть формулировано следующим образом:

Необходимо расположить левую руку таким образом, чтобы стрелки, показывающие направление магнитных линий, своими остриями уперлись в ладонь и чтобы четыре вытянутых пальца совпали с направлением тока; тогда большой палец укажет направление перемещения проводника (фиг. 302).

---

[1] См. проф. К. А. Круг, Основы электротехники.

Сила, с которой магнитное поле будет действовать на проводник, может быть вычислена по формуле

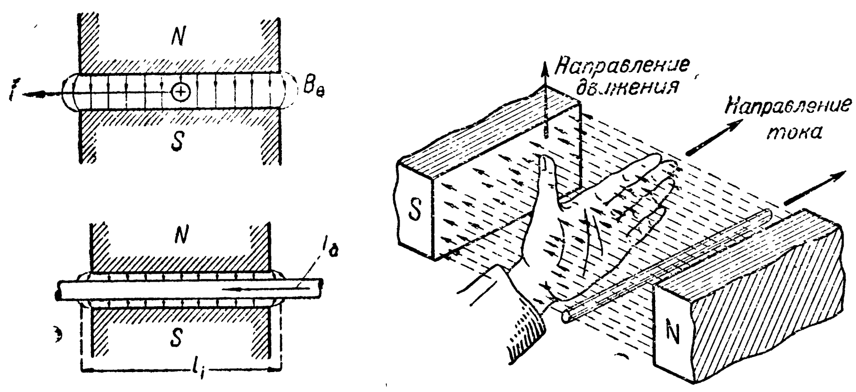
$$f=\frac{l_i \cdot i_a \cdot B_l}{9{,}81} 10^{-6} \text{ килограммов.} \qquad (137{,}1)$$

В этой формуле означают (фиг. 301):

B_l — магнитная индукция в воздушном зазоре (в гауссах),

l_i — активная (или „расчетная") длина проводника,[1]

i_a — ток в проводе (в амперах).



Фиг. 301. Движение проводника в магнитном поле.

Фиг. 302. Правило левой руки.

Эту формулу можно также написать в следующем приближенном и более удобном для пользования виде:

$$f \approx \frac{l}{100} \cdot \frac{i_a}{10} \cdot \frac{B}{10\,000} \text{ килограммов.} \qquad (137{,}2)$$

Пример 1. $l_i = 100$ cm, $i_a = 10$ *A* и $B = 10\,000$ G. На основании формулы (136,3) получается

$$f \approx \frac{100}{100} \cdot \frac{10}{10} \cdot \frac{10\,000}{10\,000} = 1 \text{ kg}.$$

Пример 2. Найдем, какая сила действует на пучок проводов, заложенных в один паз якоря 500-сильного двигателя, делающего 200 об/мин.

Данные: число проводов в пазу $u_n = 6$; ток в проводе 92,5 A; магнитная индукция в воздушном промежутке $B_l = 10\,700$ G; расчетная длина якоря $l_i = 25$ cm.

Применяя формулу (136,2), найдем силу, действующую на каждый проводник.

$$f \approx \frac{25}{100} \cdot \frac{92{,}5}{10} \cdot \frac{10\,700}{10\,000} = 2{,}47 \text{ kg}.$$

Таким образом на весь пучок проводов, заложенных в один паз, будет действовать сила

$$F = \sum f = 6 \cdot 2{,}47 = 14{,}7 \text{ kg} \approx 14{,}5 \text{ kg}.$$

Эта большая сила (около 15 kg), как будет пояснено ниже, непосредственно приложена не к проводам, заложенным в паз, а к рядом расположенным зубцам якоря (см. след. § 138).

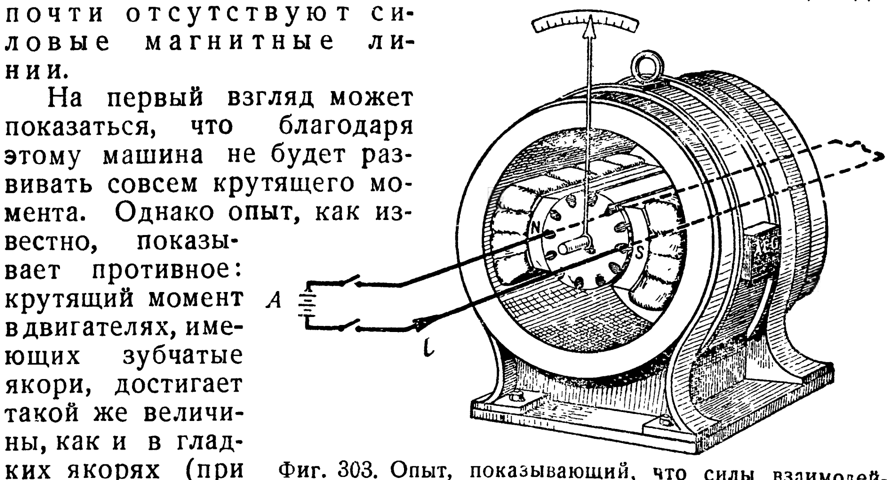
[1] Понятие о величине l_i будет дано ниже в главе о расчете машин.

§ 138. Механизм взаимодействия между проводником, заложенным в паз, и магнитным потоком. Проводники якорных обмоток в современных электрических машинах, как было указано выше, располагаются обычно в пазах, проштампованных в железе якоря.

Железные зубцы якоря представляют собой малое магнитное сопротивление по сравнению с пазами и проводят поэтому через себя почти весь силовой магнитный поток, создаваемый полюсами машины; при этом в пазах, в которых лежат провода обмотки якоря, магнитная индукция практически почти равна нулю.

Таким образом проводники зубчатого якоря машины находятся обычно в пространстве, где почти отсутствуют силовые магнитные линии.

На первый взгляд может показаться, что благодаря этому машина не будет развивать совсем крутящего момента. Однако опыт, как известно, показывает противное: крутящий момент в двигателях, имеющих зубчатые якори, достигает такой же величины, как и в гладких якорях (при прочих равных условиях).



Фиг. 303. Опыт, показывающий, что силы взаимодействия между машинными полюсами N и S и током i (от батареи A) приложены не к проводам, а к зубцам железа якоря.

Возникает вопрос: к каким местам зубчатого якоря приложены те силы, которые создают вращающий момент машины? Ответ получается следующий: эти силы приложены не к проводам непосредственно, а к железным зубцам якоря.

Таким образом мы имеем здесь дело с действием магнитного потока, создаваемого полюсами машины, на железные зубцы тела якоря.

Что это в действительности так, можно показать опытом, изображенным на фиг. 303.[1]

На этой фигуре показана станина двухполюсного двигателя постояннсго тока; внутри станины расположен зубчатый необмотанный якорь, могущий вращаться в шариковых подшипниках; с валом якоря связан видный на фигуре указатель B.

В двух пазах якоря, удаленных друг относительно друга на расстояние в 180°, расположены неподвижно в пространстве два

[1] См. Dr. L. Fleischmann, AEG-Mitteilungen № 3, 1925.

медных стержня, включенные в цепь аккумуляторной батареи *А*, как показано на фиг. 303[1].

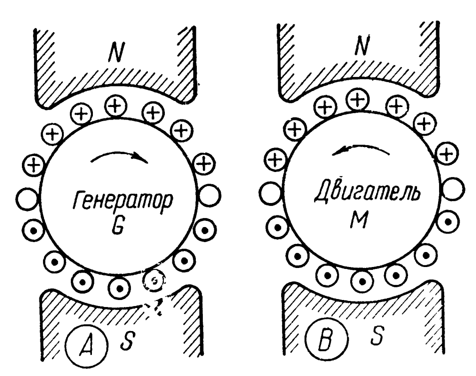
Посылая ток в электромагниты возбуждения и в оба неподвижных медных стержня, мы заметим, что в зависимости от направления тока в стержнях якорь будет перемещаться в ту или другую сторону на небольшой угол, поскольку это допускает ширина паза якоря.

Этот опыт доказывает, что в зубчатом якоре силы, создающие крутящий момент машины, приложены не к проводникам, а к зубцам якоря.

Таким образом при работе машины проводники якоря не оказывают заметного давления на стенки паза, и изоляция проводников и самого паза не подвергается большим механическим деформациям.

Это счастливое обстоятельство позволяет выполнять изоляцию паза из веществ, обладающих высокими изолирующими качествами и не отличающихся в то же время особо высокой механической прочностью (например, промасленная бумага, картон, полотно и т. п.).

§ 139. Обратимость электрических машин постоянного тока. Всякая динамомашина, работающая в качестве генератора постоянного тока, может быть пущена также двигателем в том случае, если к ней будет подведен ток извне от какого-либо источника электрической энергии. Таким образом генератор постоянного тока и двигатель — обратимы.



Фиг. 304. Работа машины генератором и двигателем.

Это явление „обратимости“ было открыто Сименсом в 1887 г.

С целью изучения этого явления обратимся к фиг. 304, *А* и *В*. Левая часть этой фигуры (схема *А*) представляет собой якорь машины, работающей в качестве генератора.

Применяя правило правой руки, нетрудно найти направление индуктированных э. д. с. в каждом проводе обмотки якоря (на фигуре эти направления указаны).

Теперь обратимся к правой схеме фиг. 304 (схема *В*). Эта схема относится к случаю работы машины в качестве двигателя, причем предположено, что направление токов, текущих в проводах обмотки якоря, и направление магнитного потока машины остались те же, что и на схеме *А*.

[1] Стержни в пазах расположены так, что якорь может при неподвижном стержне перемещаться на небольшое расстояние, соответствующее ширине паза.

Применяя правило левой руки, найдем, что в этом случае двигатель будет вращаться в направлении, противоположном вращению генератора.

§ 140. Работа машин в качестве генераторов и двигателей. На фиг. 305, *A* и *B* показаны схемы генератора *G*, питающего двигатель последовательного возбуждения *M*. Предполагая, что машины *G* и *M* на фиг. 305 совершенно идентичны, на основании предыдущего параграфа найдем, что при схеме *A* двигатель *M* будет вращаться в сторону, обратную вращению генератора *G*. Если соединения между клеммами машин *1-2* будут переделаны согласно фиг. 305,*B*,

Фиг. 305. Направление вращения сериесного двигателя *M* не изменяется при перестановке проводов, соединенных с зажимами генератора *G*.

Фиг. 306. Направление вращения шунтового двигателя не изменяется при перемене полярности зажимов.

направление вращения двигателя *M*, тем не менее, останется то же самое, что и на фиг. 305, *A*, так как при схеме *B* одновременно с изменением направления тока в обмотке электромагнитов возбуждения происходит также изменение направления тока в якоре (показано на фиг. 305 стрелками), в результате чего крутящий момент двигателя *M* будет направлен в ту же сторону.

Таким образом мы приходим к заключению, что одинаково намотанные машины последовательного возбуждения при работе их генератором и двигателем вращаются в обратные стороны.

Для изменения направления вращения машины, работающей двигателем, необходимо, как будет указано ниже, изменить относительное направление тока в одной из обмоток: возбуждения или якоря.

Обратимся теперь к фиг. 306, на которой изображены машины шунтового возбуждения.

При схеме фиг. 306, *B* соединения между генератором *G* и двигателем *M* выполнены таким образом, что направления тока в обмотках якорей обеих машин совпадают; направление токов в шунтовых обмотках обеих машин при этом будет, как видно из фигуры, разное; поэтому направление вращения якоря *M* машины, работающей двигателем, будет совпадать с направлением вращения генератора *G*.

Если переставить концы, соединяющие между собой машины *G* и *M*, как показано на фиг. 306, *A*, направление вращения двигателя *M* от этого не изменится, так как при этом одновременно с изменением направления тока в якоре происходит также изменение направления тока в обмотке возбуждения.

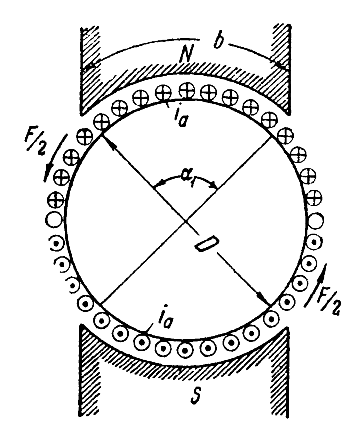
§ 141. Реверсирование двигателей. На основании предыдущего ясно, что одной перестановки проводов, соединяющих двигатель с сетью, недостаточно для изменения направления вращения.

Для того чтобы осуществить последнее, необходимо так пересоединить двигатель, чтобы:

1) при том же направлении тока в якоре направление тока в электромагнитах возбуждения было обратное прежнему или

2) при том же направлении тока в электромагнитах возбуждения направление тока в якоре было обратное прежнему.

В первом случае должна быть переключена обмотка возбуждения, во втором — обмотка якоря.



Фиг. 307. Двухполюсный двигатель.

§ 142. Величина крутящего момента двигателя постоянного тока. На фиг. 307 дано схематическое изображение якоря двухполюсного двигателя постоянного тока.

Применяя правило левой руки к случаю фиг. 307, мы найдем, что якорь двигателя будет вращаться в направлении, противоположном стрелке часов. Попытаемся найти величину крутящего момента, который будет развивать двигатель.

При расчете примем во внимание только активные проводники, лежащие под полюсами; остальные провода лежат в междуполюсной зоне, где нет магнитного поля, и потому не должны быть вводимы в расчет.

Группа проводов, лежащих под одним полюсом, дает некоторое тангенциальное усилие; назовем его через $\frac{F}{2}$; суммарный крутящий момент, создаваемый группой активных проводов, лежащих под северным и южным полюсами, будет

$$M = \text{радиус} \times \text{тангенциальное усилие} = \frac{D}{2} \cdot F.$$

Суммарное тангенциальное усилие F складывается из отдельных сил f, действующих на каждый провод, и будет согласно уравнению (93,1) равно

$$F = \sum f = i_a l_i B_l \frac{10^{-6}}{9{,}81} \left[\alpha_i N \right],$$

где $\alpha_i N$ — число активных проводников, одновременно участвующих в образовании крутящего момента (т. е. проводов, лежащих под полюсами, внутри полюсного угла охвата α_i).

Таким образом крутящий момент M выразится формулой

$$M = \frac{D}{2} F = i_a l_i B_l [\alpha_i N] \frac{D}{2} \; \frac{10^{-6}}{9{,}81} \text{ kg/cm}. \qquad (142{,}1)$$

Преобразуем полученное нами выражение, причем предположим, что двигатель имеет $2p$ полюсов и якорь его имеет $2a$ параллельных ветвей; подставим в выражение (142,1) следующие значения:

$$i_a = \frac{I_a}{2a};$$

$$\pi D = 2p\tau; \quad \alpha_i \tau l_i B_l = \Phi;$$

тогда формула (142,1) окончательно примет следующий вид:

$$M = \frac{10^{-8}}{2\pi \cdot 9{,}81} \cdot \frac{p}{a} N \Phi I_a \text{ килограммометров} \qquad (142{,}2)$$

или

$$M = C \Phi I_a, \qquad (142{,}3)$$

$$C = \frac{10^{-8}}{2\pi \cdot 9{,}81} \cdot \frac{p}{a} N. \qquad (142{,}4)$$

Эта формула приложима для двигателя любого возбуждения.

Выше была выведена формула для крутящего момента (142,2) путем суммирования всех тангенциальных сил, получающихся в результате воздействия магнитного потока возбуждения на проводники якоря, обтекаемые током.

Такую же формулу для крутящего момента можно получить и другим путем, исходя из уравнения мощности машины.

Последнее может быть записано в следующем виде:

$$U I_a = (E + I_a R_a) I_a;$$

$$U I_a = E I_a + I_a^2 R_a.$$

Левая часть этого уравнения представляет собой по числовой величине ту мощность, которая из сети подводится к двигателю.

В правую часть уравнения входят джоулевы потери машины $I_a^2 R_a$ и электрическая мощность $E I_a$, превращаемая на валу машины в механическую.

Если назвать крутящим момент, развиваемый двигателем в килограммометрах, через M и угловую скорость вращения через ω, то можно найти электрическую мощность машины путем перемножения этих двух величин

$$P = M \cdot \omega$$

или $P = 9{,}81 \cdot M \cdot \omega$ в ваттах.

Следовательно, можно написать

$$EI_a = 9{,}81 \cdot M \cdot \omega,$$

откуда

$$M = \frac{E \cdot I_a}{9{,}81 \cdot \omega}.$$

Подставляя сюда

$$E = \frac{pn}{60} \Phi \frac{N}{a} 10^{-8}$$

и

$$\omega = 2\pi \frac{n}{60},$$

найдем

$$M = \frac{\frac{pn}{60} \Phi \frac{N}{a} 10^{-8} I_a}{9{,}81 \cdot 2\pi \frac{n}{60}},$$

или

$$M = \frac{10^{-8}}{2\pi \cdot 9{,}81} \cdot \frac{p}{a} N\Phi I_a = C\Phi I_a, \qquad (142{,}5)$$

т. е. мы пришли в результате выводов к тому же уравнению, которое нами было получено в предыдущем параграфе другим путем.

Подставляя в вышенаписанное уравнение

$$\frac{NI_a}{2a} = Ni_a = \pi DAS,$$

мы перепишем уравнение в несколько измененном виде:

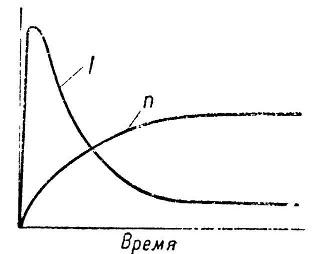
$$M = \frac{10^{-8}}{9{,}81} D \cdot p \cdot \Phi \cdot AS. \qquad (142{,}6)$$

Полученная формула дает интересную зависимость между крутящим моментом двигателя и диаметром якоря, а также другими характерными величинами: магнитным потоком и линейной нагрузкой якоря.

ГЛАВА ДЕВЯТНАДЦАТАЯ

ПУСК В ХОД ДВИГАТЕЛЕЙ ПОСТОЯННОГО ТОКА

§ 143. Явления, происходящие при пуске в ход двигателей постоянного тока. Если приключить неподвижный двигатель (например, шунтового возбуждения) непосредственно к сети, то в первый момент после включения в якорь двигателя бросится ненормально большой ток; как показывает опыт, этот ток затем начнет постепенно спадать по своей величине по мере возрастания скорости двигателя. Примерный характер изменения тока I с возрастанием числа оборотов n можно видеть из фиг. 308. Для того чтобы выяснить все факторы, влияющие на величину тока двигателя, сначала рассмотрим явления, происходящие при пуске в ход, пока двигатель неподвижен, а затем перейдем к исследованию работы вращающегося двигателя.



Фиг. 308. Изменение во времени тока I и скорости n при включении двигателя в сеть без пускового реостата.

Двигатель неподвижен. При пуске в ход, пока двигатель еще не пришел во вращение, ток I_k, текущий по обмотке якоря, может быть найден на основании закона Ома:

$$I_k = \frac{U}{R_a}, \qquad (143,1)$$

где U — напряжение сети и R_a — сопротивление якоря двигателя.

Имея в виду, что сопротивление обмотки якоря двигателя вообще бывает сравнительно невелико,[1] на основании уравнения (143,1) найдем, что величина пускового тока I_k должна быть (по сравнению с током, нормальным для двигателя) относительно очень велика.

Двигатель вращается. Как только якорь двигателя начнет вращаться, ток в якоре немедленно начнет убывать. Причиной такого убывания тока служит новый фактор, влияющий на ток, появление которого теснейшим образом связано с явлением вращения двигателя; это — так называемая противодействующая электродвижущая (противо-э.д.с.) сила якоря.

Причина появления последней следующая:

При вращении двигателя провода его якорной обмотки пересекают силовые линии магнитного поля, создаваемого обмоткой возбуждения; благодаря этому в проводах обмотки якоря наводится некоторая э. д. с.

Попытаемся выяснить, как будет влиять эта новая э. д. с. на величину тока I, текущего в якоре.

Для того чтобы решить этот вопрос, рассмотрим фиг. 309.

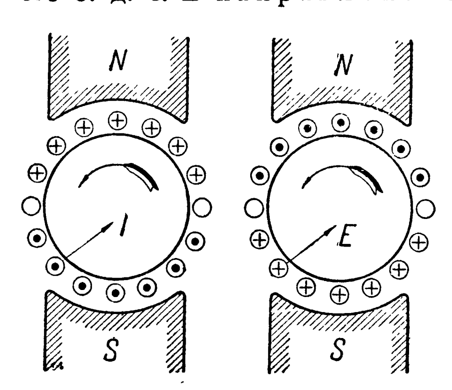
---

[1] Оно зависит от мощности двигателя и того напряжения, на которое построен двигатель.

На левом рисунке этой фигуры показан якорь, обтекаемый током двигателя I; применяя правило левой руки, найдем, что при направлении тока I, показанном на левом рисунке, якорь будет стремиться вращаться в сторону, обратную вращению часовой стрелки.

На правом чертеже фиг. 309 показан тот же якорь, вращающийся в ту же сторону, причем указано направление индуктированной при вращении в проводах его обмотки э. д. с. E; направление э. д. с. E может быть найдено при помощи правила правой руки.

Сравнение левого и правого чертежей фиг. 309 показывает, что э. д. с. E направлена противоположно току I и, следовательно, стремится его ослабить. Поэтому эта э. д. с. носит название противодействующей.



Фиг. 309. Ток I (левый чертеж) и противо-э. д. с. E (правый чертеж) в якоре двигателя.

Таким образом ток в якоре вращающегося двигателя будет устанавливаться не одним напряжением сети U, как это было при неподвижном якоре, а разностью $U-E$:

$$I=\frac{U-E}{R_a}, \qquad (143,2)$$

где U — напряжение сети;
E — противо-э. д. с.;
R_a — сопротивление якоря.

§ 144. Величина тока короткого замыкания. Выше нами было найдено следующее выражение для тока, текущего в якоре вращающегося двигателя:

$$I=\frac{U-E}{R_a}.$$

Обозначив разность $U-E$ через $\Delta U=\varepsilon \cdot U$, перепишем это уравнение в следующем виде:

$$I=\frac{\Delta U}{R_a}=\frac{\varepsilon \cdot U}{R_a}.$$

При пуске в ход, когда якорь неподвижен, вместо уравнения (143,2) мы должны написать:

$$I_k=\frac{U}{R_a}.$$

Сравнивая уравнения (143,1) и (143,2), находим

$$\frac{I_k}{I}=\frac{1}{\varepsilon}. \qquad (144,1)$$

Для небольших двигателей (мощностью около 1 — 2 kW) падение напряжения в якоре при нормальном токе $I=I_н$ составляет

обычно около 10% от напряжения на зажимах, т. е. $\varepsilon = 10\%$; подставляя эго значение в формулу (144,1), найдем

$$I_k = \frac{1}{\varepsilon} I_н = \frac{1}{(0,1)} \cdot I_н = 10\ I_н.$$

При $\varepsilon = 5\%$ (машины средней мощности от 10 до 100 kW) получится

$$I_k = \frac{1}{0,05} \cdot I_н = 20\ I_н.$$

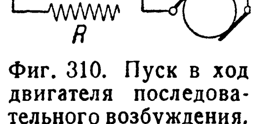
При $\varepsilon = 2\%$ (машины большой мощности) будет

$$I_k = \frac{1}{0,02} \cdot I_н = 50\ I_н.$$

Таким образом мы видим, что ток короткого замыкания в двигателях постоянного тока может достигать весьма больших значений и колебаться в широких пределах.

§ 145. Пусковые схемы. Выше было найдено (§ 144), что пусковой ток двигателя, включенного прямо к зажимам сети, во много раз превосходит нормальный ток.

Вследствие этого только очень небольшие двигатели (мощностью меньше $^1/_4$ *л. с.*) пускаются в ход путем непосредственного их включения в сеть.



Фиг. 310. Пуск в ход двигателя последовательного возбуждения.

При больших мощностях обычно для ограничения тока при пуске в ход включаются в цепь якоря сопротивления — так называемые пусковые реостаты. Последние постепенно выводятся из цепи по мере того, как двигатель, придя во вращение, постепенно начинает увеличивать свою скорость, вследствие чего начинает убывать ток в якоре.

На фиг. 310 показана схема соединения пускового реостата R с двигателем последовательного возбуждения; показанная на этой фигуре ползушка реостата должна занимать при пуске в ход крайнее правое положение и должна быть постепенно передвигаема влево, по мере увеличения скорости двигателя.

На фиг. 311 показана пусковая схема шунтового двигателя. Из этой фигуры видно, что обмотка возбуждения приключена непосредственно к сети; обмотка же якоря соединена с сетью посредством реостата R.

На фиг. 312 показана схема ошибочного соединения шунтового двигателя с пусковым реостатом R.[1] Разница между схемой фиг. 311 и фиг. 312 состоит в том, что в первом случае обмотка возбуждения N приключена непосредственно к сети, в то время

---

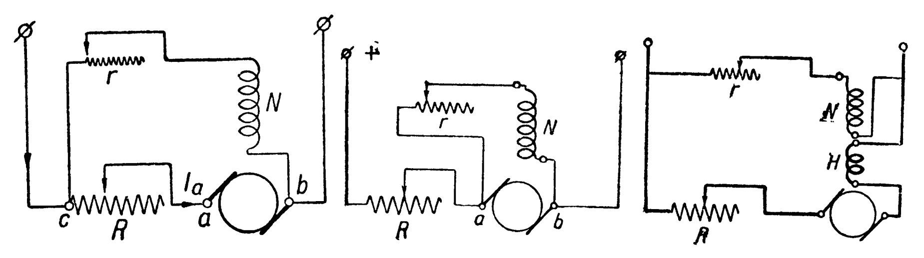
[1] Такую схему иногда ошибочно выполняют неопытные лица, начинающие изучать электротехнику.

как во втором случае обмотка N приключена шунтом к щеткам a и b якоря.

Это небольшое на первый взгляд расхождение в обеих схемах влечет, однако, за собой чрезвычайно важные последствия. Оказывается, что двигатель, соединенный по схеме фиг. 312, раскручивается медленно при большом пусковом токе и что его начальный крутящий момент при этой схеме очень невелик.

Причина этого заключается в ослаблении магнитного потока при пуске в ход.

Действительно, при пуске в ход согласно фиг. 312 почти все напряжение линии в первый момент поглощается в реостате R, поэтому напряжение на щетках a и b очень невелико; так как к тем же точкам a и b приключена шунтовая обмотка N, то при



Фиг. 311. Правильная пусковая схема шунтового двигателя.

Фиг. 312. Неправильная пусковая схема шунтового двигателя.

Фиг. 313. Пуск в ход и регулирование скорости двигателя смешанного возбуждения.

этих условиях ток в обмотке N будет невелик, и поток Ф при пуске в ход будет мал.

Таким образом для получения достаточного начального момента понадобится из сети сравнительно большой ток I_a для того, чтобы произведение $Ф \cdot I_a \equiv M$ было достаточно велико.

Отсюда ясно, что двигатель, соединенный по схеме фиг. 312, будет брать из сети при пуске большой ток. Указанным здесь недостатком схема фиг. 311 не обладает, так как при этой схеме обмотка возбуждения N при пуске в ход приключена непосредственно к сети, благодаря чему магнитный поток Ф при пуске здесь достаточно велик, и, следовательно, высокий начальный крутящий момент здесь может быть достигнут без большого повышения пускового тока.

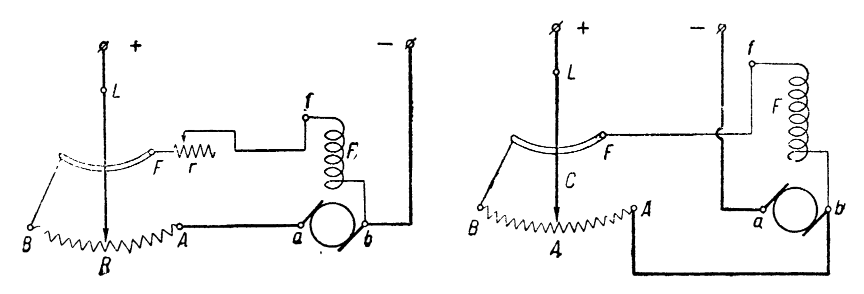
На фиг. 313 показана пусковая схема двигателя смешанного возбуждения.

Во всех рассматриваемых здесь схемах (фиг. 311—313) ползушка шунтового реостата при пуске в ход должна находиться в крайнем левом положении для того, чтобы магнитный поток Ф при пуске в ход имел наибольшую величину.

Реостат r, изображенный на схемах фиг. 311—313, служит для регулировки скорости двигателя. Как будет выяснено ниже, ослабляя ток в шунте при помощи реостата r, мы достигаем

увеличения скорости двигателя; наоборот, при усилении тока в шунте мы получаем уменьшение скорости.

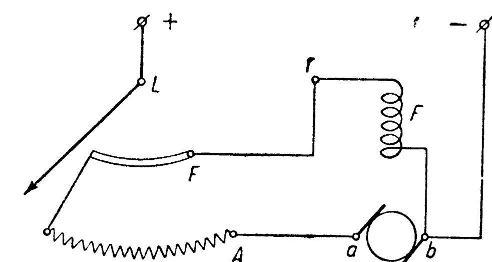
§ 146. Схема соединения двигателя с пусковым реостатом, осуществляемая на практике. На фиг. 314 (левый чертеж) показана схема соединения шунтового двигателя с пусковым реостатом в том виде, как эти соединения обычно осуществляются на практике. При этом соединении клемма рукоятки реостата *L* обычно соединяется с одной из сетевых клемм (например,



Фиг. 314. Правильная (левый чертеж) и неправильная (правый чертеж) схемы включения шунтового двигателя.

с клеммой +, как показано на фигуре); медная скоба *F*, с которой рукоятка реостата должна иметь хороший контакт, соединяется с началом *f* шунтовой обмотки *F*, и точка *A* реостата должна быть соединена со щеткой *a* якоря двигателя. При такой схеме обмотка возбуждения *F* двигателя оказывается приключенной к полному линейному напряжению при всяком положении рукоятки реостата.

Как видно из фиг. 314, медная скобка реостата *F* имеет соединение с точкой *B* реостата. Это соединение обычно делается для того, чтобы при левом положении рукоятки, когда цепь якоря отключается от сети, обмотка возбуждения все же не размыкалась во избежание появления больших напряжений, которые могут наводиться в обмотке возбуждения при размыкании цепи и испортить ее изоляцию (фиг. 314а).



Фиг. 314а. При разомкнутом положении рукоятки реостата обмотка возбуждения *F* замкнута через сопротивление реостата.



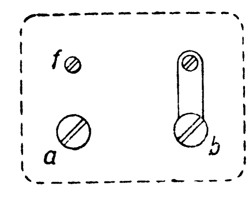
§ 147. Ошибочная схема соединения шунтового двигателя с пусковым реостатом. При выполнении схемы соединения шунтового двигателя с пусковым реостатом легко сделать ошибку, если не обратить должного внимания на порядок соединения реостата с клеммами двигателя.

На фиг. 314 (правый чертеж) показана ошибочная схема

соединения. Неправильная схема этой фигуры отличается от правильной схемы тем, что клемма *A* пускового реостата в неправильной схеме соединена с клеммой двигателя *b*, представляющей собой общую точку конца якорной и шунтовой обмоток (при правильном соединении клемма реостата *A* должна быть соединена с клеммой двигателя *a*), как показано на левом чертеже фиг. 314.

Вследствие такой на первый взгляд небольшой ошибки двигатель при пуске может подвергнуться большой опасности.

Действительно, рассматривая путь тока в правой схеме фиг. 314, мы видим, что при пуске в ход, когда рукоятка реостата находится в крайнем левом положении, на зажимах шунтовой обмотки *f* и *b* будет действовать почти полное линейное напряжение; однако при перемещении рукоятки реостата в крайнее правое положение, когда точки реостата *F* и *A* будут замкнуты на короткое рукояткой *C* реостата, обмотка возбуждения *F* окажется **замкнутой накоротко**, и ток в ней упадет до нуля. Это положение представляет для двигателя большую опасность, так как при исчезновении тока возбуждения противо-э.д.с. двигателя тоже исчезает, в результате чего ток двигателя увеличится до опасных пределов.



Фиг. 315. Клеммовая доска шунтового двигателя.

Обычно неправильность соединения согласно правому чертежу фиг. 314 нетрудно бывает заметить по тому ненормально большому **возрастанию скорости** двигателя, которое получается по мере перемещения рукоятки пускового реостата в правое положение. Эта большая скорость двигателя обусловлена тем, что при ошибочной схеме напряжение на концах шунтовой обмотки *f* — *b* получается меньше напряжения сети и равно падению напряжения на участке *A′ A* пускового реостата: $IR = \Delta U$; по мере приближения рукоятки реостата к правому положению ΔU делается все меньше и меньше и при крайнем правом положении рукоятки обращается в нуль (фиг. 314, правая схема).

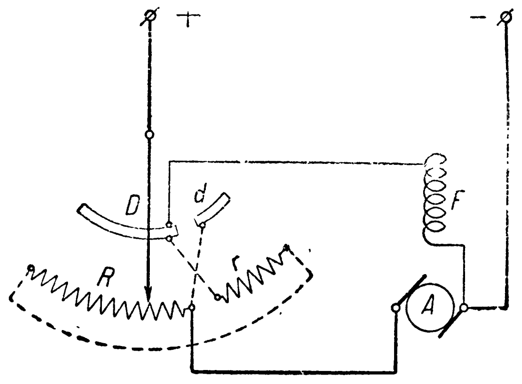
Во избежание ошибки при соединении следует обращать внимание на порядок присоединения зажимов реостата к клеммам двигателя.

На фиг. 315 изображено примерное расположение клемм, какие обычно принято выводить на дощечку двигателя; здесь обозначают: *a* — начало якорной обмотки, *f* — начало обмотки возбуждения и *b* — **общая точка** соединения концов обмотки якоря и возбуждения.

§ 148. Пускорегулирующий реостат шунтового двигателя. На фиг. 316 показан реостат, представляющий собой соединение в одно конструктивное целое пускового реостата *R* и шунтового *r* для регулировки скорости. Благодаря соединениям, выполненным внутри реостата (показаны на фиг. 316 пунктиром), и благодаря наличности двух медных дуг *D* и *d*, с которыми

рукоятка реостата при ее перемещении имеет все время хороший контакт, имеется возможность пользоваться этим реостатом и как пусковым и как шунторегулирующим.

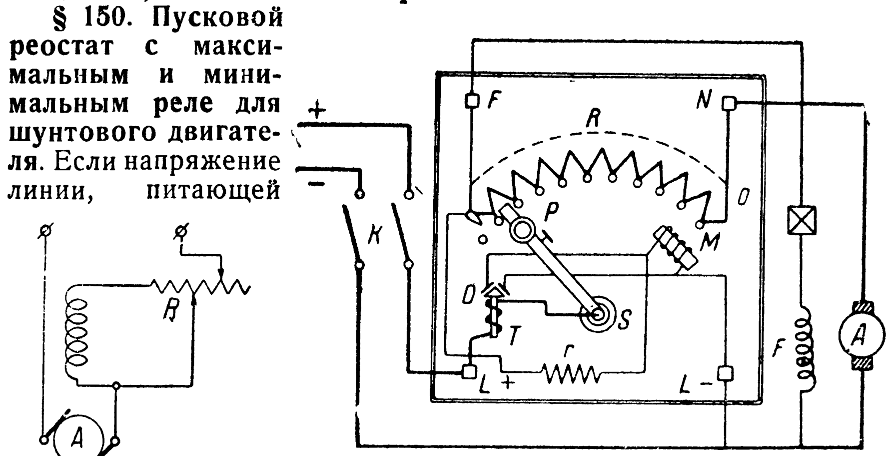
Рассматривая схему фиг. 316, нетрудно убедиться, что при левом положении рукоятки реостата (когда последняя касается скобы *D*) в цепь якоря включается пусковое сопротивление *R*, а при правом положении рукоятки (когда последняя касается скобы *d*) в цепи якоря сопротивления *R* уже нет, но включено сопротивление *r* в цепь электромагнитов возбуждения. Таким образом скоба *D* с реостатом *R* служит для пуска в ход и скоба *d* с реостатом *r* — для регулировки скорости.



Фиг. 316. Соединение в одно целое пускового *R* и шунтового *r* реостата.

§ 149. Пускорегулирующий реостат сериесного двигателя. В двигателях последовательного возбуждения один и тот же реостат *R* может быть использован и в качестве пускового и в качестве регулировочнсго (по методу шунтирования обмотки возбуждения); в этом случае реостат должен иметь две ползушки или рукоятки с независимым перемещением, как показано на фиг. 317.

§ 150. Пусковой реостат с максимальным и минимальным реле для шунтового двигателя. Если напряжение линии, питающей



Фиг. 317. Регулирование скорости сериесного двигателя.

Фиг. 317а. Пусковой реостат с автоматическим выключением. *М*—минимальное реле; *Т*—максимальное реле; *А*—якорь двигателя; *F*—возбуждение.

двигатель, почему-либо упадет до нуля, двигатель остановится. Если после этого, спустя некоторое время, линия опять будет

включена на полное напряжение, то двигатель, приключенный к этой линии, может пострадать от чрезмерно большого тока, который бросится в неподвижный якорь.

Для того чтобы этого не случилось, необходимо, чтобы при выключении напряжения линии в цепь якоря остановившегося двигателя немедленно было введено пусковое сопротивление. Эта манипуляция может быть осуществлена автоматически в пусковых реостатах специальной конструкции.

На фиг. 317а изображена схема одного из таких реостатов.

Особенность этой схемы составляют два соленоида; обмотка одного соленоида *M* приключена к напряжению линии (один зажим обмотки *M* приключен через рубильник *K* к — сети, другой зажим посредством одной из клемм сопротивления *R* и через рукоятку реостата к + сети).

Другой соленоид *T*, как видно из фиг. 317а, обтекается главным током двигателя.

При левом — разомкнутом — положении рукоятки, показанном на фиг. 317а, катушка электромагнита *M* не приключена к сети.

При пуске в ход, когда рукоятка реостата касается контактов реостата *R*, в катушке *M* пойдет ток.

Когда пуск в ход закончится и рукоятка реостата станет в правое положение, железный якорь *P*, приделанный к рукоятке, притянется электромагнитом *M*, и рукоятка реостата останется в крайнем положении, несмотря на действие пружины *S*, которая стремится вернуть рукоятку в левое положение.

При выключении рубильника *K* поток электромагнита *M* упадет до нуля, и пружина *S* вернет рукоятку в левое положение. Если напряжение линии упадет до нуля, рукоятка реостата также автоматически вернется в левое положение.

Электромагнит *M* выполняет функции минимального реле, выключающего цепь двигателя при падении напряжения на зажимах двигателя до нуля (или до какой-либо минимальной величины напряжения в зависимости от силы пружины *S*).

Соленоид *T* выполняет функции максимального реле; обтекаемый главным током двигателя он втягивает в себя железный сердечник при некотором максимальном токе и производит короткое замыкание контактов *D*; последнее влечет за собой, как видно из фиг. 317а, короткое замыкание обмотки *M*, вследствие чего магнитный поток электромагнита *M* падает до нуля и реостат выключается.

§ 151. Автоматические пусковые реостаты. В тех случаях, когда работа мотора происходит без постоянного обслуживающего персонала (например, при водяных насосах, компрессорах, центрифугах, подъемниках и т. п.), на практике иногда находят применение автоматические пусковые приспособления.

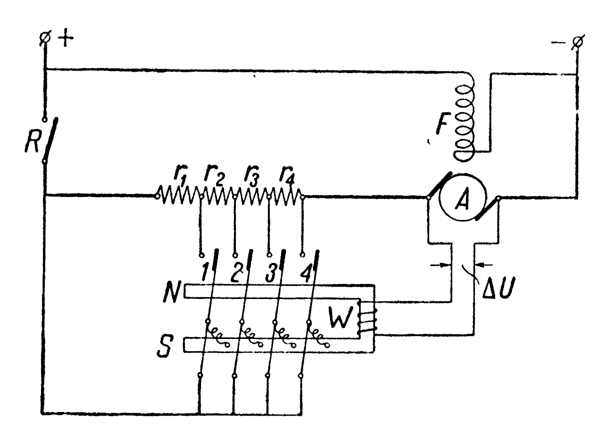
Идею одного из таких пусковых устройств поясняет фиг. 318.

На этой фигуре изображен шунтовой двигатель, якорь которого *A* присоединен к сети посредством рубильника *R* и ряда

пусковых сопротивлений r_1, r_2,..., r_4; обмотка возбуждения F этого двигателя приключена непосредственно к сети.

Характерную часть устройства представляет собой электромагнит NS, обмотка которого W присоединена к щеткам двигателя A.

При пуске в ход, пока якорь A неподвижен, все напряжение сети теряется в сопротивлениях r_1 и r_4, и между щетками якоря A действует очень малая разность потенциалов ΔU. Однако по мере раскручивания двигателя и по мере уменьшения тока, текущего через сопротивления r_1 и r_4 и якорь A, разность потенциалов ΔU на коллекторе начинает постепенно увеличиваться, благодаря чему ток в катушке W возрастает, и сила притяжения полюсов N и S электромагнита постепенно также увеличивается.



Фиг. 318. Автоматический пуск в ход шунтового двигателя.

В соответствии с этим при раскручивании двигателя один за другим притягиваются к полюсам N и S электромагнита железные рычаги-замыкатели *1, 2,..., 4*, снабженные оттягивающими пружинами разной силы; благодаря этому в известной последовательности замыкаются на короткое отдельные секции r_1, r_2,..., r_4 пускового реостата, и процесс пуска в ход заканчивается.

ГЛАВА ДВАДЦАТАЯ

РАБОТА ДВИГАТЕЛЕЙ ПОСТОЯННОГО ТОКА

§ 152. Шунтовой двигатель. а) Зависимость скорости двигателя от нагрузки; роль противо-э.д.с. Найдем зависимость между числом оборотов в минуту n и током нагрузки I_a двигателя:

$$n = f(I_a).$$

Для якоря двигателя можно написать уравнение

$$U = E + I_a R_a. \tag{152,1}$$

Здесь U — напряжение у зажимов, $I_a R_a$ — падение напряжения в якоре, E — противо-э. д. с., равная

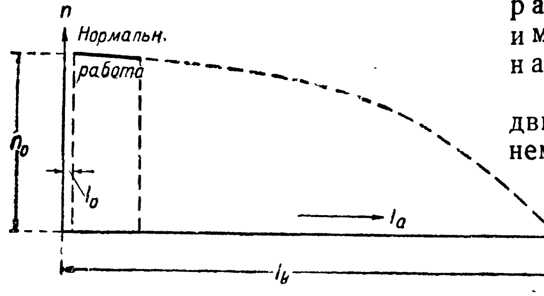
$$E = \frac{p}{a} \cdot \frac{n}{60} \Phi N 10^{-8} \text{ вольт.}$$

Найдем из уравнения (143,2) ток I_a:

$$I_a = \frac{U - E}{R_a}.$$

Это — чрезвычайно важное уравнение в теории двигателей постоянного тока, характеризующее работу двигателя. Противоэлектродвижущую силу E, входящую в это уравнение, было бы уместно назвать „регулятором потребления тока" двигателем из сети.

Благодаря существованию этой противо-э. д. с. двигатель забирает из сети ток как раз такой величины, которая соответствует имеющейся нагрузке на валу двигателя.



Фиг. 319. Характеристика числа оборотов n шунтового двигателя.

Так, например, если мы двигатель нагрузим, то он немного „сядет" (т. е. его скорость немного уменьшится), в результате чего величина противо-э. д. с. E соответственным образом также уменьшится, числитель выражения (143,2) станет больше, и ток I_a в якоре возрастет.

При уменьшении нагрузки двигателя случится обратное: число оборотов слегка увеличится, что повлечет за собой увеличение противо-э. д. с. E и согласно уравнению (143,2) соответственное уменьшение тока в якоре двигателя I_a.

Таким образом благодаря существованию „регулятора потребления тока" в виде противо- э. д. с. ток в якоре двигателя устанавливается такой величины, которая в точности соответствует имеющейся нагрузке на валу двигателя.

На фиг. 319 изображена кривая зависимости n от тока нагрузки I_a в шунтовом двигателе. Из этой фигуры мы видим, что зависимость $n = f(I_a)$ представляет собой пологую кривую, пересекающую в некоторой точке ось абсцисс.

Этой точке перечесения соответствует наибольший ток или ток короткого замыкания двигателя, равный I_k; наибольшее значение тока при этих условиях получается вследствие того, что при $n = 0$ исчезает противо-э. д. с. ($E = 0$) и сила тока

$$I_a = \frac{U}{R_a} = I_{\max} = I_k.$$

Кривая фиг. 319 показывает, что при уменьшении нагрузки число оборотов двигателя n возрастает; наибольшее число оборотов двигателя получается при холостом ходе $n = n_0$.

Для определения числа оборотов при холостом ходе n_0 подставим в уравнение (143,2) вместо E ее значение при холостом ходе E_0 и вместо I_a — ток холостого хода I_0:

$$I_0 = \frac{U - E_0}{R_a} = \frac{U - \frac{p}{a} \cdot \frac{n_0}{60} N \Phi 10^{-8}}{R_a};$$

отсюда

$$n_0 = \frac{U - I_0 R_a}{\left(\frac{p}{a} \cdot \frac{10^{-8}}{60} N\right) \Phi}, \qquad (152,2)$$

или

$$n_0 \approx \frac{U}{\left(\frac{p}{a} \cdot \frac{10^{-8}}{60} N\right) \Phi}, \qquad (152,3)$$

так как при холостом ходе $I_0 R_a \approx 0$.

Часть кривой n, соответствующая нормальной работе двигателя, показана на фиг. 319 жирной линией. Нормальная работа двигателя обычно лежит в таких пределах, которым соответствуют сравнительно незначительные колебания числа оборотов (в пределах примерно от 2 до 5% от нормального числа оборотов в зависимости от мощности двигателя).

b) Влияние на очертания характеристики числа оборотов реакции якоря. Обращаясь к формуле, дающей число оборотов шунтового двигателя

$$n = \frac{U - I_a R_a}{C \Phi}, \qquad (152,4)$$

мы видим, что число оборотов n изменяется обратно пропорционально потоку возбуждения Φ.

Этот поток Φ является некоторой функцией нагрузки двигателя и вообще слегка уменьшается с увеличением нагрузки (вследствие реакции якоря).

Таким образом мы видим, что в нашей формуле (152,4) с увеличением тока I_a убывают одновременно и числитель и знаменатель.

Если при возрастании тока I_a числитель выражения (152,4) будет уменьшаться быстрее, чем уменьшается его знаменатель, то ординаты кривой $n = f(I_a)$ будут уменьшаться с увеличением I_a.

Наоборот, если при этом сильнее будет уменьшаться знаменатель (например, благодаря большой реакции якоря), то ординаты этой кривой будут возрастать при увеличении нагрузки. В первом случае (малая реакция якоря) мы получим кривую I, во втором случае (большая реакция якоря) получится

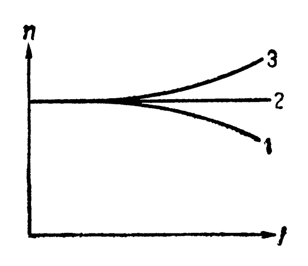
кривая *3* (фиг. 320). Можно получить и промежуточный случай, когда благодаря действию реакции якоря число оборотов двигателя почти не меняется с нагрузкой (кривая *2*, фиг. 320).

Кривые типа *3* и *2* можно получить у двигателя со смещенными щетками (против направления вращения) или с противокомпаундной обмоткой. Обычно на практике мы имеем дело с кривой *1*.

с) Явления, происходящие при случайном размыкании цепи возбуждения работающего шунтового двигателя. Иногда при работе шунтового двигателя возможны случаи размыкания цепи возбуждения, вызванные каким-либо дефектом схемы.

Такое размыкание является крайне опасным и может повлечь за собой при известных условиях полную порчу двигателя. Причину этого можно себе уяснить, исследуя уравнение

$$I_a = \frac{U - E}{R_a}.$$



Фиг. 320. Характеристика: *1*—шунтовой двигатель; *2*—*3*—двигатель со смещенными щетками.

Из этого уравнения видно, что при обрыве цепи возбуждения (вследствие чего $E = 0$) сила тока двигателя должна возрасти до ненормально большой величины

$$I_k = \frac{U}{R_a}.$$

Двигатель может пострадать не только от сильного перегрева обмотки якоря, вызванного ненормально большим током I_k, но может быть также поврежден механически благодаря недопустимо большой скорости, которую может приобрести якорь в первый момент после обрыва.

Дело в том, что после обрыва цепи шунта магнитный поток Ф машины падает не сразу до нуля, но часто довольно медленно приближается к нулю благодаря тормозящему действию тех токов Фуко, которые наводятся в массивном железе полюсов машины при изменении потока Ф. Для машин большой мощности этот процесс спадания потока Ф после обрыва цепи шунта может длиться многие десятки секунд.

Пока происходит это уменьшение потока Ф, число оборотов двигателя чрезвычайно быстро растет; как показывает формула (152,4), при $\Phi \approx 0$ число оборотов машины должно быть очень велико.

Такое ненормально большое число оборотов и связанное с этим появление больших центробежных сил может вызвать при известных условиях разрушение двигателя.

Во избежание этого двигатель должен иметь в главной цепи якоря плавкий предохранитель или достаточно чувствительный автомат, который бы немедленно отключал двигатель от сети при каждом ненормально большом повышении тока в якоре.

d) Крутящий момент. Найдем теперь зависимость между моментом вращения M и током нагрузки I_a:

$$M = f(I_a).$$

Крутящий момент двигателя пропорционален току якоря I_a и потоку возбуждения Φ:

$$M \equiv I_a \Phi.$$

В шунтовом двигателе мы имеем

$$E = U - I_a R_a \approx \text{const}.$$

Так как $E \equiv \Phi$, то $\Phi \approx \text{const}$, т. е. в шунтовом двигателе величина магнитного потока возбуждения при всяких изменениях нагрузки остается величиной приблизительно постоянной.[1]

Следовательно, для шунтового двигателя в первом приближении мы можем написать

$$M \equiv I_a.$$

При этом момент вращения M будет изображаться на диаграмме в виде прямой линии (пунктирная кривая фиг. 321).

Фиг. 321. Поток возбуждения Ф и крутящий момент M в функции тока I.

На самом деле вследствие реакции якоря и магнитного насыщения поток Φ будет убывать с увеличением нагрузки (см. кривую Φ); вследствие этого кривая моментов будет загибаться несколько книзу, как показано на фиг. 321 (сплошная кривая).

§ 153. Двигатель последовательного возбуждения. a) Крутящий момент. Крутящий момент двигателя последовательного возбуждения (так же как и шунтового) пропорционален произведению

$$M \equiv \Phi \cdot I.$$

При малых магнитных насыщениях мы можем предположить, что для сериесного двигателя $\Phi \equiv I$, вследствие чего

$$M \equiv I^2. \qquad (153,1)$$

Эта зависимость показывает, что крутящий момент сериесного двигателя возрастает прямо пропорционально второй степени рабочего тока.[2]

---

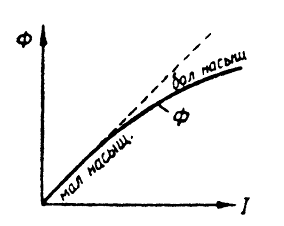
[1] Если пренебречь влиянием реакции якоря.

[2] Уравнение (153,1) показывает, что при значительных изменениях момента сопротивления на валу сериесного двигателя соответственные изменения тока, текущего в якоре двигателя, получаются не столь значительными. Это свойство сериесного двигателя является чрезвычайно полезным в тех случаях, когда нагрузка на валу двигателя колеблется в широких пределах (например, в случае трамвайной тяги, подъемников и т. п.).

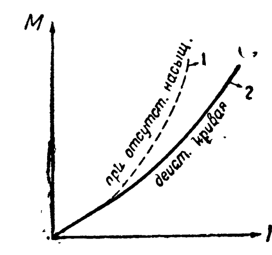
Для сравнения вспомним, что для двигателей шунтового возбуждения крутящий момент возрастает пропорционально лишь первой степени тока:

$$M \equiv I.$$

Зависимость (153,1) имеет несколько приближенный характер; в действительности вследствие магнитного насыщения поток Ф не будет пропорционален току I (фиг. 322), и действительная кривая моментов 2 пойдет ниже, чем теоретическая кривая 1 (фиг. 323).



Фиг. 322. Влияние магнитного насыщения на форму кривой зависимости магнитного потока Ф от тока I сериесного двигателя.



Фиг. 323. Влияние магнитного насыщения на форму кривой $M = f(I)$ в сериесном двигателе.

Так как при малых магнитных насыщениях мы имеем $\Phi \equiv I$, а при больших магнитных насыщениях $\Phi \approx \text{const}$, то отсюда видно, что кривая моментов сериесного двигателя при малых насыщениях протекает по параболе, при больших же насыщениях кривая моментов приближается к прямой линии и протекает при дальнейшем возрастании тока двигателя приблизительно прямолинейно.

b) Характеристика скорости. Для нахождения характеристики числа оборотов сериесного двигателя обратимся к уравнению (152,4):

$$n = \frac{U - I_a R_a}{C\Phi}.$$

Так как $\Phi \equiv I$, то из уравнения (152,4) следует, что скорость сериесного двигателя должна увеличиваться по мере уменьшения его нагрузки.

Пренебрегая величиной падения напряжения в якоре $I \cdot R_a$, на основании уравнения (152,4) найдем

$$\Phi n = \text{const},$$

или, так как $\Phi \equiv I$, то

$$n I \approx \text{const}.$$

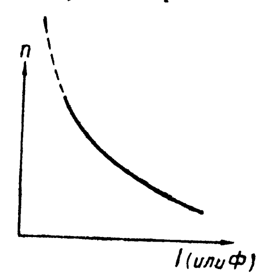
На основании последнего уравнения мы видим, что изменение скорости двигателя n в функции тока I происходит по кривой гиперболы. Как видно из фиг. 324, эта кривая пересекает начальную ординату в бесконечно удаленной точке.

Это значит, что число оборотов n_0 холостого хода, при котором ток двигателя $I = 0$, равно бесконечности.

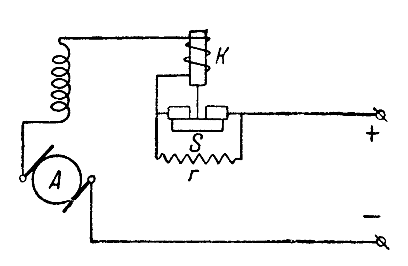
В действительности сила тока двигателя при холостом ходе хотя и не равна нулю, но все же очень мала по сравнению с нормальным током; поэтому число оборотов холостого хода сериесного двигателя n_0, в действительности хотя и не равное ∞,

все же может превосходить во многие десятки раз нормальное число оборотов. Это высокое число оборотов представляет большую опасность для двигателя и должно быть поэтому избегаемо.

Отсюда следует, что полная разгрузка двигателя последовательного возбуждения при нормальном напряжении совершенно недопустима. Поэтому такой двигатель может быть применен только в тех случаях, когда полная его разгрузка невозможна (например, для крановых устройств, электрической тяги и т. п.).



Фиг. 324. Характеристика числа оборотов в сериесном двигателе.



Фиг. 325. Ограничение скорости сериесного двигателя.

c) Графическое построение характеристики скорости. Выше было сказано, что изменение скорости сериесного двигателя в функции тока I происходит по кривой, сходной с гиперболой.

Однако такое утверждение справедливо лишь приблизительно при условии пренебрежения магнитным насыщением машины.

Учитывая последнее, можно графически построить кривую изменения скорости двигателя в функции нагрузки.

На фиг. 325а дано такое построение. Вначале строим кривую изменения потока Ф или пропорциональной ему э. д. с. якоря E_0 в функции тока I, предполагая, что число оборотов якоря при этом остается постоянным, т. е. что $n_0 = \text{const}$ (кривая I на фиг. 325а).

Затем строим кривую изменения противодействующей э. д. с. E в функции тока I в предположении изменяющегося числа оборотов n и предполагая, что напряжение у зажимов

$$U = \text{const}.$$

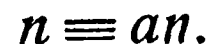
Эта зависимость по фиг. 325а представлена в виде наклонной линии II. Расстояние из вертикали между наклонной линией II и пунктирной горизонталью будет в некотором масштабе равно падению напряжения в обмотках машины.

Имея кривые I и II, можем построить кривую III, представляющую собой изменения скорости сериесного двигателя n в функции тока нагрузки I.

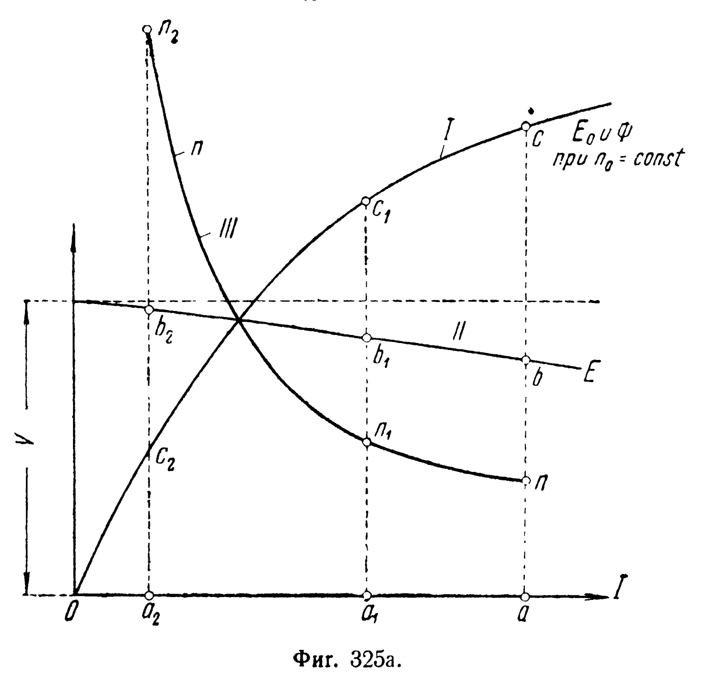
Имея в виду, что $n \equiv \frac{E}{\Phi}$, а при одном и том же потоке $\frac{E_0}{E} = \frac{n_0}{n}$, мы можем для силы тока $I = Oa$ написать

$$n \equiv \frac{E}{\Phi} = c\frac{ab}{ac} = \frac{E}{E_0}\, n_0 = \frac{ab}{ac}\, n_0.$$

Таким образом в точке a мы можем в некотором масштабе отложить число оборотов, соответствующее этому току,



$$n \equiv an.$$



Фиг. 325а.

Таким же образом для тока Oa_1 найдем

$$n_1 = \frac{a_1b_1}{a_1c_1}\, n_0; \quad n_1 \equiv a_1\, n_1.$$

Для точки a_2 получится

$$n_2 = \frac{a_2b_2}{a_2c_2}\, n_0; \quad n_2 \equiv a_2n_2 \ldots \text{ и т. д.}$$

Получив несколько точек n, n_1 и n_2, можно построить кривую $n = f(I)$, как показано на фиг. 325 (см. кривую III).

d) Меры борьбы с явлением „разноса" двигателей последовательного возбуждения. Магнитный поток возбуждения Ф в сериесном двигателе, как уже было сказано, изменяется приблизительно пропорционально току двигателя. Поэтому при холостом ходе, когда величина рабочего тока невелика и, следовательно, магнитный поток возбуждения

тоже невелик, число оборотов двигателя может достигнуть опасно большой величины — двигатель может, как говорят, „разнести“.

Существуют приспособления, предотвращающие такой разнос двигателя.

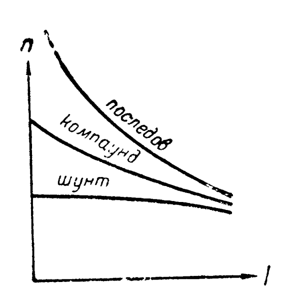
На фиг. 325 в виде примера показано одно из таких приспособлений.

Как видно из этой фигуры, в главную цепь двигателя включен соленоид *K*, который при некотором достаточном токе притягивает железный сердечник и удерживает выключатель *S* в замкнутом состоянии.

При чрезмерном увеличении скорости двигателя ток уменьшается, выключатель *S* выключается, и в результате этого в цепь двигателя вводится дополнительное сопротивление *r*; благодаря этому напряжение на зажимах двигателя понижается, и число оборотов делается меньше.

О других мерах против „разноса“ сериесных двигателей говорится в следующем параграфе.

§ 154. Двигатель смешанного возбуждения. Для устранения опасности разноса сериесных двигателей кроме описанного выше метода есть еще другой; последний заключается в том, что сериесный двигатель снабжают еще добавочной шунтовой обмоткой. В результате получится двигатель смешанного возбуждения. Число оборотов холостого хода в таком двигателе теперь не будет достигать опасно большой величины, как это имело место при сериесном двигателе благодаря тому, что поток возбуждения при холостом ходе теперь не будет спадать до нуля.



Фиг. 326. Характеристика скорости шунтового, компаундного и сериесного двигателей.

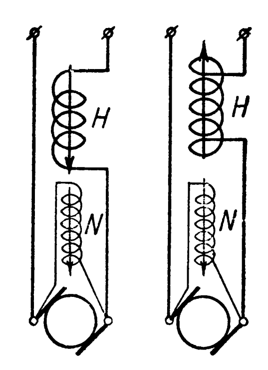
Вместо добавочной шунтовой обмотки можно выполнить магнитную цепь машины из стального литья с большой коэрцитивной силой; благодаря этому в двигателе будет достаточно большое остаточное магнитное поле, которое ограничит верхний предел скорости при разгрузке двигателя.

Характеристика скорости компаундного двигателя имеет менее крутые очертания, чем характеристика сериесного двигателя; она занимает промежуточное положение между характеристиками шунтового и сериесного двигателей (фиг. 326).

§ 155. Двигатель с противокомпаундным возбуждением. На фиг. 327 (левый чертеж) изображена схема компаундного двигателя, в котором компаундная обмотка включена в цепь таким образом, что она у с и л и в а е т поток, создаваемый шунтовой обмоткой. Если включить компаундную обмотку в о б р а т н о м направлении, то эта обмотка будет о с л а б л я т ь поток, создаваемый шунтовой обмоткой (фиг. 327, правый чертеж); при этом получится двигатель с п р о т и в о к о м п а у н д н ы м в о з б у ж д е н и е м. Выбрав надлежащим образом число витков противоком-

паундной обмотки, мы можем добиться того, что **число оборотов двигателя при изменении нагрузки будет приблизительно сохранять свою величину неизменной**.

Недостатком таких двигателей является их наклонность к „качаниям"; это явление состоит в том, что скорость двигателя при некоторых условиях нагрузки начинает периодически колебаться около некоторого среднего значения скорости.



Фиг. 327. Двигатель с компаундным и противокомпаундным возбуждением.

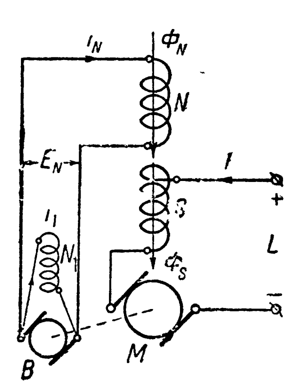
§ 156. Двигатель с постоянным числом оборотов. Как было выяснено выше, число оборотов шунтового двигателя с увеличением нагрузки убывает. Кроме того, при колебании напряжения в сети число оборотов двигателя также изменяется. При некоторых установках, однако, требуется большое постоянство числа оборотов двигателя.

В этом случае, как описано выше, можно применять двигатели смешанного возбуждения, у которых сериесная обмотка включена **навстречу** шунтовой обмотке, т. е. двигатели с так называемым противокомпаундным возбуждением.

Еще большее постоянство числа оборотов можно получить, применяя схему, показанную на фиг. 328.

Как видно из этой фигуры, двигатель M, питаемый от сети L, имеет две обмотки возбуждения: одна обмотка S питается главным током I, другая обмотка N получает питание от особого возбудителя B, сидящего на одном валу с M.

Возбудитель B имеет шунтовое возбуждение N_1, причем так рассчитан, что при нормальном числе оборотов двигателя M возбудитель B не дает никакого напряжения.



Фиг. 328. Двигатель с постоянным числом оборотов. M — двигатель; B — возбудитель.

Для того чтобы это было возможно, характеристика этого возбудителя *1* (фиг. 329) должна иметь такие очертания, чтобы ее прямолинейная часть приблизительно совпадала с прямой i_1r_1 (где i_1 — ток в шунте возбудителя и r_1 — сопротивление шунтовой обмотки возбудителя).

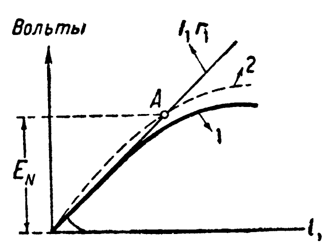
При самом незначительном возрастании числа оборотов двигателя выше нормального происходит следующее:

Характеристика возбудителя получает другие очертания, и вместо кривой *1* получается кривая *2* (фиг. 329), благодаря этому прямая i_1r_1 пересекается с кривой *2* в точке A, и **возбудитель возбуждается до напряжения** E_N. Последнее влечет за собой появление тока i_N в обмотке N главной машины,

вследствие чего магнитный поток возбуждения этой машины возрастает на величину Φ_N и число оборотов двигателя *М* в соответствии с этим падает (фиг. 328). Как видно из фиг. 329, достаточно весьма небольших изменений ординат кривой *2*, чтобы вызвать в возбудителе достаточно большую э. д. с. E_N.

Таким образом самое незначительное увеличение числа оборотов двигателя влечет за собой соответственное увеличение потока Φ_N, умеряющего скорость двигателя.

В трамвайном вагоне обычно все вспомогательные цепи (освещение, вспомогательные двигатели-контакторы и т. п.) получают питание от троллейного провода. В случае пригородных железных дорог или дорог дальнего следования, когда напряжение троллейного провода превышает 1 000 V, такой непосредственный способ питания является уже недопустимым. В этом случае приходится ставить понизительный двигатель-генератор, состоящий из двигателя постоянного тока высокого напряжения, получающего питание от воздушного провода и низковольтного генератора постоянного тока, питающего местную сеть. При сильно колеблющемся напряжении троллейного провода число оборотов двигателя мотор-генератора будет также сильно колебаться, в результате чего будет также изменяться и напряжение на коллекторе генератора.

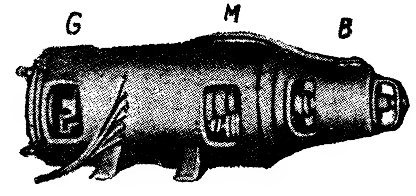


Фиг. 329. Характеристика возбудителя *В* (фиг. 328).

Во избежание этих недостатков в этих случаях применяется схема, изображенная на фиг. 328.

Схема фиг. 328 обладает тем свойством, что даже при относительно большом колебании напряжения сети *L* скорость двигателя *М* остается приблизительно постоянной.

На фиг. 330 показана фотография двигатель-генератора с двигателем, соединенным по схеме фиг. 328.



Фиг. 330. Двигатель-генератор для установки на электровозе (фиг. 328). *М* — мотор; *В* — возбудитель; *G* — генератор.

На этой фотографии видны: *G* — генератор постоянного тока мощностью в 25 kW на 36 V; *М* — двигатель постоянного тока на 1 300 V; *В* — возбудитель.

Опыты, произведенные с агрегатом, показали, что при колебании напряжения на зажимах двигателя *М* в пределах от 600 до 1 200 V число оборотов агрегата колебалось в пределах $\pm 3{,}5\%$.[1]

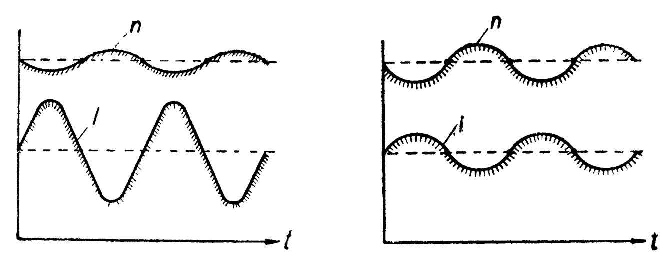
§ 157. Работа двигателей шунтового и смешанного возбуждения с маховиком. Как было выяснено выше, компаундный двигатель имеет характеристику числа оборотов *n*, более круто

[1] См. BBC-Mitteilungen № 29, 1928.

опускающуюся книзу с увеличением нагрузки, чем это имеет место для двигателя шунтового возбуждения.

Подобные очертания характеристики (с крутым падением) особенно желательны в том случае, если двигатель снабжен маховиком для уменьшения толчков тока в сети при нагрузке (также толчки тока постоянно встречаются при работе, например, двигателя с железопрокатным станом и в других тому подобных установках).

Роль маховика, как известно, заключается в том, что он служит своего рода аккумулятором энергии; при уменьшении нагрузки на валу двигателя число оборотов последнего возрастает, и кинетическая энергия, запасенная маховиком, в соответственной мере увеличивается; наоборот, при возрастании нагрузки число оборотов двигателя уменьшается, и энергия, запасенная в маховике, начинает расходоваться на преодоление полезного сопротивления.



Фиг. 331—332. Колебание тока I и числа оборотов в минуту n в двигателе шунтового возбуждения (левый чертеж) и в двигателе смешанного возбуждения (правый чертеж).

В этом смысле роль маховика, сидящего на валу двигателя, можно сравнить с ролью аккумуляторной батареи, работающей параллельно с динамомашиной на некоторую сеть.

При возрастании электрической нагрузки на помощь динамомашине приходит аккумуляторная батарея, которая воспринимает на себя часть внешней нагрузки; при этом, как будет указано ниже, эта помощь аккумуляторной батареи тем больше, чем круче протекает внешняя характеристика генератора.

Явления аналогичного порядка мы имеем при работе электрического двигателя, снабженного маховиком; при этом, как было сказано выше, роль аккумуляторной батареи здесь играет маховик.

Для того чтобы маховик, сидящий на одном валу с двигателем, мог отдавать в достаточной мере при перегрузках часть своей кинетической энергии, необходимо, чтобы двигатель имел такую характеристику, при которой получается относительно большое падение скорости n двигателя при возрастании нагрузки; для этой цели, как было выяснено выше, двигатель должен иметь смешанное возбуждение.

При соблюдении последнего условия в случае падения скорости двигателя освободившаяся часть кинетической энергии маховика расходуется на преодоление полезных сопротивлений

на валу двигателя: происходит, если можно так выразиться, „разряд“ маховика: маховик принимает на себя часть внешней нагрузки, разгружая в этот период времени центральную станцию, питающую электрический двигатель.

Сказанное можно иллюстрировать при помощи фиг. 331—332; на этой фигуре показаны примерные колебания числа оборотов n и тока I, получаемые двигателем из сети для двух случаев: 1) для двигателя шунтового возбуждения с маховиком (левый чертеж) и 2) для двигателя смешанного возбуждения с маховиком (правый чертеж).

Сравнивая между собой оба чертежа, мы видим, что при смешанном возбуждении колебание скорости n делается больше, чем при шунтовом, но зато колебания тока I в соответственной мере уменьшаются.

ГЛАВА ДВАДЦАТЬ ПЕРВАЯ

РЕГУЛИРОВАНИЕ СКОРОСТИ, РЕВЕРСИРОВАНИЕ И ТОРМОЖЕНИЕ ДВИГАТЕЛЕЙ

§ 158. Различные способы регулирования скорости. Известно несколько методов регулирования скорости двигателя постоянного тока. Для выяснения всех особенностей этих методов обратимся к выражению противо-э. д. с. двигателя:

$$E = \frac{p}{a} \cdot \frac{n}{60} N\Phi\, 10^{-8}.$$

Из этой формулы найдем число оборотов в минуту n

$$n = \frac{1}{N} \cdot \frac{E}{\Phi}\left[\frac{a}{p} \cdot 60 \cdot 10^{8}\right].$$

Предполагая приближенно $E \approx U$, перепишем последнюю формулу:

$$n = \frac{1}{N} \cdot \frac{U}{\Phi}\left[\frac{a}{p} \cdot 60 \cdot 10^{8}\right]$$

или

$$n = C\frac{1}{N} \cdot \frac{U}{\Phi}, \qquad (158,1)$$

где C — некоторая постоянная.

Последнее уравнение дает нам указания относительно возможных методов регулирования скорости двигателей постоянного тока.

Уравнение нам показывает, что регулировка скорости двигателя может быть осуществлена таким образом:

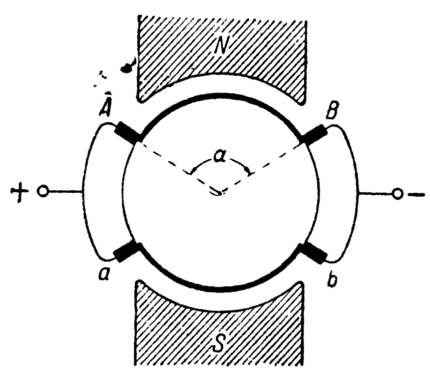
1) путем изменения числа активных проводов N обмотки якоря;

2) путем изменения напряжения на зажимах двигателя;

3) путем изменения величины потока возбуждения Ф.

Рассмотрим все три способа в отдельности.

§ 159. Первый способ регулирования скорости двигателя (изменение числа активных проводов якоря *N*). На первый взгляд может показаться, что этот способ неприменим на практике ввиду невозможности изменять по желанию число проводов якоря *N* в существующем двигателе. В действительности, однако, при помощи небольшого усложнения конструкции двигателя, а именно при помощи добавочной пары щеток, можно осуществить изменение числа активных (обтекаемых током) проводов якоря *N*.



Фиг. 333. Регулирование скорости двигателя путем смещения щеток.

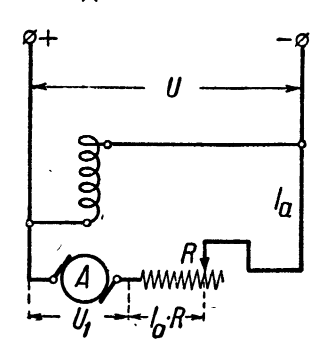
Идею этого метода поясняет фиг. 333.

Соединяя щетки двигателя между собой, как показано на фиг. 333, мы видим, что в части обмотки между соединенными друг с другом накоротко щетками тока нет и что, таким образом, активными проводами якоря являются только те, которые лежат между разноименными щетками под полюсами (эти места обмотки якоря на фиг. 332 показаны жирными линиями).

Таким образом, сдвигая или раздвигая щетки *Aa*, *Bb*, мы имеем возможность менять число активных проводников якоря и, следовательно, регулировать число оборотов двигателя.

Способ этот применяется сравнительно редко и только для малых машин; причиной служит, главным образом, ухудшение коммутации, вызываемое смещением щеток.

§ 160. Кажущийся парадокс. На фиг. 334 показана схема соединения двигателя с реостатом *R*, при которой возможна широкая регулировка скорости (сопровождающаяся, заметим, значительным снижением к. п. д.).



Фиг. 334. Регулирование скорости шунтового двигателя по методу включения реостата *R* в цепь якоря *A*.

Как видно из фиг. 334, здесь якорь машины последовательно соединен с реостатом *R*, а обмотка возбуждения приключена к сети.

Нагрузив вал двигателя постоянным тормозным моментом (например, при помощи тормоза Прони), мы увидим, что амперметр *A* в цепи якоря будет показывать практически неизменную силу тока I_a в якоре независимо от перемещения ползушки реостата *R*.

При изменении сопротивления *R* будет изменяться скорость двигателя: при уменьшении *R* скорость будет возрастать и при

увеличении R — уменьшаться. Однако при всех изменениях скорости якоря, повторяем, сила тока I_a будет оставаться практически неизменной.

В чем заключается причина этого парадоксального, на первый взгляд, факта?

Объяснение можно получить, обращаясь к зависимости

$$M = C \cdot \Phi \cdot I_a.$$

При $\Phi = \text{const}$ мы получаем

$$M = C I_a,$$

отсюда следует, что при любых изменениях R в случае постоянства величины момента на валу ($M = \text{const}$) мы будем наблюдать в якоре двигателя неизменную силу тока I_a, так как

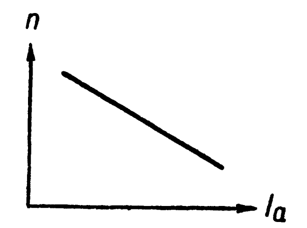
$$M = C \cdot I_a = \text{const},$$

откуда

$$I_a = \text{const}.$$

§ 161. Второй способ регулирования скорости двигателя (изменение напряжения на зажимах U). Метод последовательного реостата Для осуществления этого способа часто применяется схема, изображенная на фиг. 334. Как видно из этой фигуры, последовательно с обмоткой якоря соединен реостат R; благодаря этому при прохождении тока часть напряжения, равная $I_a R$, теряется в реостате, и на зажимы двигателя остается напряжение, равное

$$U_1 = U - I_a R.$$



Фиг. 335. Зависимость тока I_a в якоре двигателя от числа оборотов n при последовательном соединении якоря с добавочным сопротивлением согласно фиг. 333.

Регулируя сопротивление R, мы можем получать различные значения U_1 и, следовательно, согласно формуле (158,1) регулировать скорость двигателя.

Главным недостатком этого способа является повышение потерь энергии, вызванное реостатом R.

Второй недостаток этого способа заключается в том, что двигатель шунтового возбуждения при схеме фиг. 334 теряет свою характеристику скорости: перестает сохранять приблизительно неизменную скорость при разных нагрузках.

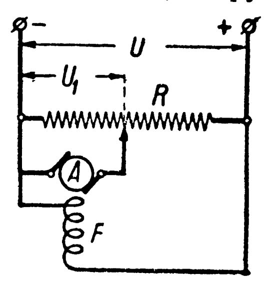
Причина этого лежит в том, что при изменении силы тока в якоре I_a соответственным образом изменяется величина падения напряжения $I_a R$ в реостате, и в связи с этим происходит также изменение напряжения U_1 на зажимах двигателя.

Примерная характеристика скорости, которая получается при такой схеме, изображена на фиг. 335.

Первый потенциометрический метод. Отмеченное выше колебание скорости двигателя при изменении его нагрузки

можно уменьшить, видоизменив схему фиг. 334 так, как показано на фиг. 335.

Как видно из последней фигуры, реостат R приключен непосредственно к сети; якорь же двигателя одной клеммой приключен к сети, а другой к ползушке реостата. Таким образом, передвигая ползушку реостата, мы можем изменять величину напряжения U_1, приложенного к щеткам якоря.



Фиг. 336. Регулирование скорости шунтового двигателя по методу потенциометра (первый способ).

Напряжение U_1 в схеме фиг. 336 при условии, что величина сопротивления R выбрана не очень большой по сравнению с сопротивлением якоря двигателя, с изменением тока меняется по своей величине не особенно значительно.

Кроме того, поток возбуждения, несмотря на изменение величины U_1, остается постоянным, так как обмотка возбуждения, как показано на фиг. 336, все время остается непосредственно приключенной к сети.

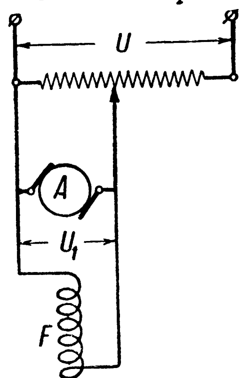
При таких условиях скорость двигателя держится довольно устойчиво при изменениях тока и разных положениях ползушки реостата. Эта схема дает возможность довольно широкой регулировки скорости двигателя.

Недостатком этого метода является понижение к. п. д., вызванное потерями в реостате. Последнее обстоятельство ограничивает применение этого метода только сравнительно малыми машинами.

На фиг. 337 дана другая схема потенциометрического соединения двигателя с реостатом, которая иногда ошибочно выполняется.

От предыдущей эта схема отличается тем, что к пониженному напряжению U_1 здесь приключена не только обмотка якоря A, но также и обмотка возбуждения F.

Благодаря этому при изменении напряжения U_1 на щетках двигателя в ту же сторону изменяется также и поток возбуждения.



Фиг. 337. Регулирование скорости шунтового двигателя по методу потенциометра (неправильное соединение).

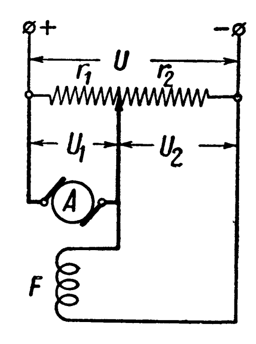
Таким образом при схеме фиг. 336 число оборотов n двигателя будет изменяться мало, так как в выражении для n согласно предыдущему [см. уравнение (158,1), § 158] напряжение U_1 входит в числитель, а поток Ф входит в знаменатель; при работе двигателя в ненасыщенной части характеристики, когда поток Ф возрастает почти прямо пропорционально напряжению U_1, мы получим при разных значениях напряжения почти постоянное число оборотов двигателя:

$$n = \frac{U}{\Phi} \approx \text{const}.$$

Вследствие этого схема фиг. 337 для регулировки двигателя обычно не применяется.

Из уравнения (158,1) получается следующее следствие:

Если шунтовой двигатель предназначается для работы в сети, напряжение которой сильно колеблется, и если требуется от двигателя большое постоянство скорости при работе, то необходимо такой двигатель строить с большими сечениями магнитной цепи для того, чтобы его магнитное насыщение было невелико. В таком случае при колебании напряжения сети U в такой же мере будет изменяться и поток Φ, вследствие чего число оборотов n будет оставаться приблизительно постоянным.



Фиг. 338. Регулирование скорости шунтового двигателя по методу потенциометра (второй способ).

В т о р о й п о т е н ц и о м е т р и ч е с к и й м е т о д. Схема, изображенная на фиг. 336, может быть видоизменена так, как это показано на фиг. 338.

В отличие от предыдущей схемы здесь обмотка возбуждения F приключена не к сетевому напряжению, а к части напряжения U_2.

Благодаря этому при перемещении ползушки реостата вправо (фиг. 338) напряжение на щетках якоря U_1 увеличивается, а напряжение на концах обмотки возбуждения U_2 соответственно уменьшается, благодаря чему происходит возрастание скорости двигателя. При крайнем правом положении рукоятки получится $U_2 = 0$, причем магнитный поток возбуждения двигателя исчезнет; во избежание этого рукоятку реостата при схеме фиг. 338 никогда не следует передвигать в такое крайнее положение.

М н о г о п р о в о д н а я с и с т е м а. Описанные выше потенциометрические методы дают возможность путем изменения напряжения на щетках якоря двигателя менять его скорость в широких пределах.

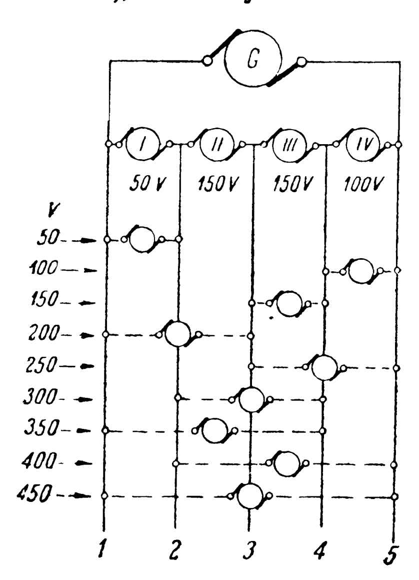
Изменение напряжения на зажимах двигателя можно осуществить и по другому более совершенному с точки зрения к. п. д. методу.

Этот метод требует устройства особой сети с подразделением напряжения. Простейший случай такой сети мы имеем в виде трехпроводной системы. Например, при сети 2×220 V мы имеем возможность приключать двигатель по желанию либо к проводам на 220 V, либо 440 V, благодаря чему можно получить две устойчивых скорости двигателя, относящиеся друг к другу как 1 : 2.

Если необходимо иметь более широкие пределы регулировки, вместо трехпроводной системы можно применять системы, где число ступеней напряжения больше. В текстильной промышленности для обслуживания печатных машин часто применяется пятипроводная система. Схема такой системы представлена на

фиг. 339. Как видно из этой фигуры, крайние провода сети получают питание от главной динамомашины G.

К зажимам последней приключены четыре делительные машины напряжения *I*, *II*, *III* и *IV*. Приключив к зажимам делительных машин пять проводов, как показано на фиг. 339, мы имеем возможность получить девять различных напряжений. Так, приключая двигатель к первой паре проводов слева (провода *1-2*), мы получаем на зажимах двигателя 50 V; затем, приключая двигатель к проводам *4-5*, получаем 100 V; приключая к проводам *3-4*, получаем 150 V; приключая к проводам *1-3*, получаем 200 V; приключая к проводам *3-5*, получаем 250 V и т. д.



Фиг. 339. Пятипроводная система

Показанная на фиг. 339 схема позволяет изменять напряжение на зажимах двигателя в пределах от 50 до 450 V, что дает изменение скорости двигателей приблизительно в отношении 1 : 9.

Размеры уравнительных машин вообще бывают относительно невелики, так как эти машины обычно выполняются быстроходными и так как, кроме того, через эти машины проходит лишь сравнительно небольшой выравнивающий ток. [1]

§ 162. Третий способ регулирования скорости двигателя (изменение величины потока возбуждения Ф). На основании уравнения (152,4) можем написать

$$n \approx \frac{C_1}{\Phi},$$

где C_1 — некоторая постоянная.

Эта формула показывает, что скорость двигателя при постоянной величине напряжения на зажимах изменяется обратно пропорционально величине потока возбуждения Ф.

Отсюда следует, что для у в е л и ч е н и я, например, скорости двигателя следует поток возбуждения Ф у м е н ь ш и т ь и, наоборот, для у м е н ь ш е н и я скорости поток Ф следует увеличить.

Перепишем формулу (158,1) в следующем виде:

$$\Phi n = C_1.$$

---

[1] К этой же категории регулирования скорости (путем изменения напряжения на зажимах двигателя U_1) может быть также отнесен метод Л е о н а р д а (об этом методе см. гл. XXV).

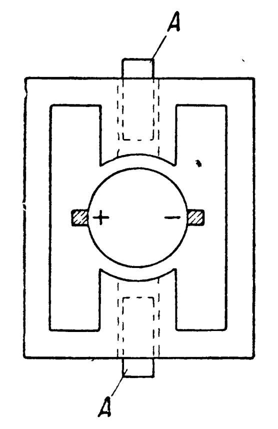
Если построить это уравнение по точкам в прямоугольной системе координат, то получится гипербола вроде показанной раньше на фиг. 324.

Как видно из этой фигуры, левая ветвь кривой уходит в бесконечность. Это значит, что при случайном размыкании цепи возбуждения в двигателе шунтового возбуждения или полном коротком замыкании обмотки возбуждения сериесного двигателя, когда поток $\Phi \approx 0$, число оборотов двигателя делается очень большим:

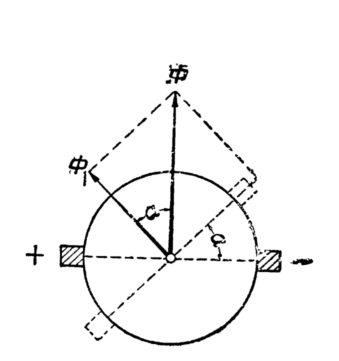
$$n \approx \infty.$$

Это ненормально большое увеличение скорости может повлечь за собой разнос двигателя от центробежной силы и его порчу; этот вопрос был подробно изложен выше, в § 152.

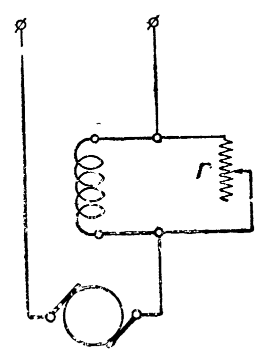
§ 163. Способы изменения величины магнитного потока возбуждения. Изменение магнитного сопротивления полюсного сердечника. Стоу (Stow) дает метод, согласно которому изменение потока Ф достигается путем изменения



Фиг. 340. Изменение величины потока возбуждения путем перемещения железных брусков *A* и *A*.



Фиг. 341. Изменение величины полезного потока Φ_1 возбуждения путем смещения щеток на коллекторе.



Фиг. 342. Изменение потока возбуждения сериесного двигателя.

величины магнитного сопротивления полюсных сердечников. Для этой цели в середине полюсных сердечников устроено цилиндрическое отверстие, внутри которого находится железный цилиндр *A* (фиг. 340).

Перемещая этот цилиндр, можно изменять величину магнитного сопротивления сердечника, а следовательно, и поток Ф.

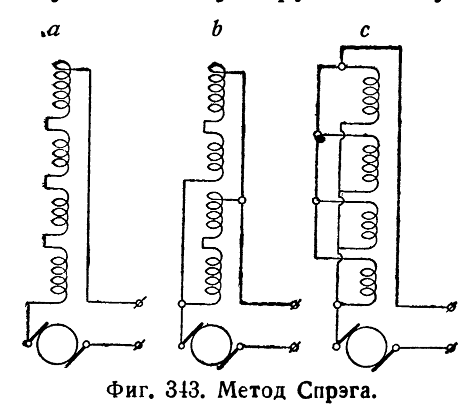
Смещение щеток на коллекторе. Смещая щетки, можно изменять полезную слагающую потока возбуждения.

Так, сместив щетки на угол α относительно нейтрального положения, путем графического построения, ясного из фиг. 341, найдем слагающую, являющуюся полезным потоком:

$$\Phi_1 = \Phi \cos \alpha.$$

Отсюда видно, что, изменяя угол α, можно регулировать величину Φ_1.

Шунтирование обмотки возбуждения. Этот способ чаще всего применяется в двигателях последовательного возбуждения. Шунтируя обмотку возбуждения некоторым сопротивлением r, мы тем самым меняем величину силы тока в обмотке возбуждения и вместе с тем и поток Ф (фиг. 342).



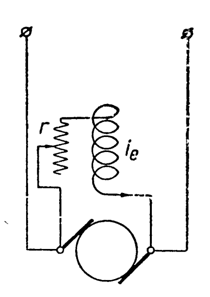
Фиг. 343. Метод Спрэга.

Переключение обмотки возбуждения (система Спрэга, Sprague). Иногда применяют еще другой метод регулировки потока Ф, заключающийся в том, что обмотка возбуждения двигателя разбивается на несколько секций, которые соединяются друг с другом последовательно или параллельно; благодаря этому изменяется соответствующим образом число намагничивающих ампервитков обмотки возбуждения, а вместе с тем меняется также поток Ф.

На фиг. 343 изображена схема такого регулирования в применении к сериесным двигателям.

Эта система впервые была предложена инженером Спрэгом для трамвайной тяги.

Как видно из фиг. 343, вся обмотка возбуждения разбита на четыре секции; при схеме *a* все секции соединены последовательно; при схеме *b* из секций образованы две группы, состоящие из двух последовательно соединенных секций, причем обе группы друг с другом соединены параллельно; наконец, при схеме *c* все секции обмотки возбуждения соединены друг с другом параллельно.



Фиг. 344. Изменение потока возбуждения шунтового двигателя.

При том же токе в якоре схема *a* дает наибольший поток и схема *c* — наименьший.

В случае параллельной работы нескольких двигателей при такой системе регулировки чрезвычайно трудно бывает добиться равномерного распределения тока между отдельными двигателями.

Это затруднение обусловлено тем, что при переключениях обмотки возбуждения бывает затруднительно добиться совершенно одинаковой величины магнитных потоков возбуждения Ф всех параллельно работающих двигателей.

Здесь сказываются заметным образом: некоторая неодинаковость сопротивления обмоток возбуждения отдельных двигателей, неодинаковая величина сопротивлений контактов в контрол-

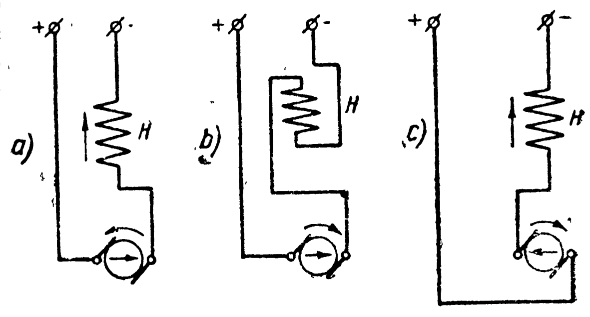
лерах, служащих для управления ходом двигателей, небольшое расхождение в величине воздушных зазоров параллельно работающих двигателей и т. п.

Поэтому эта система, несмотря на свою простоту, в случае параллельной работы нескольких двигателей для преодоления общего сопротивления (например, в трамвайных установках) в настоящее время не применяется.

Изменение сопротивления цепи шунтовой обмотки возбуждения. В машинах шунтового возбуждения изменение величины Ф осуществляется проще всего при помощи реостата r, включенного в цепь шунта, как показано на фиг. 344.

Это — наиболее распространенный на практике метод регулирования скорости шунтовых двигателей.

§ 164. Изменение направления вращения двигателей. Как было выяснено, для изменения направления вращения двигателя необходимо изменить направление тока либо только в электромагнитах возбуждения, либо только в обмотке якоря. На практике обычно применяется переключение обмотки якоря. (Переключение обмотки возбуждения избегается, так как последняя обычно имеет большую самоиндукцию, вследствие чего переключение тока в последней может вызвать в ней большие э. д. с. самоиндукции.)



Фиг. 345. Реверсирование сериесного двигателя.

На фиг. 345 и 346 даны схемы для перемены хода шунтового и сериесного двигателей.

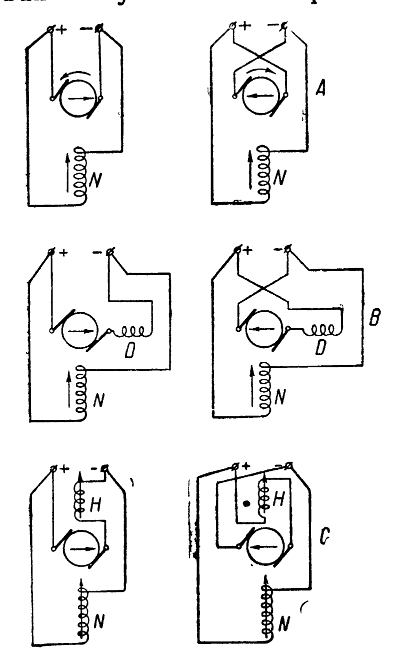
На фиг. 345 изображены всевозможные схемы переключения для перемены хода двигателя последовательного возбуждения; чаще всего применяется схема c, при которой направление тока в сериесной обмотке H не меняется.

На фиг. 346, A и B изображены схемы реверсирования шунтовых машин; характерной чертой этих схем, равно как и предыдущих, является то, что направление тока в обмотках возбуждения не меняется — изменяется только направление тока в обмотке якоря.

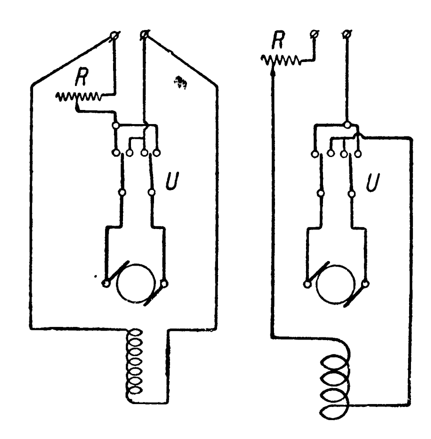
На фиг. 346, C даны схемы переключения при реверсировании двигателей смешанного возбуждения; как видно из этой фигуры, переключение цепи якоря происходит таким образом, что направление тока меняется только в обмотке якоря; направление тока в сериесной обмотке H при этом остается прежнее; в противном случае (при одновременном изменении направления тока в обмотке якоря и в сериесной обмотке) шунтовая и сериесная обмотки действовали бы друг на друга

размагничивающим образом, т. е. мы бы получили противокомпаундное возбуждение двигателя.

На фиг. 347 показана полная схема соединений двигателя с пусковым реостатом R и переключателем U для реверсирования шунтового и сериесного двигателей.



Фиг. 346. Реверсирование двигателей шунтового и смешанного возбуждения. N — шунтовая обмотка; H—сериесная обмотка; D — обмотка дополнительных полюсов.



Фиг. 347. Реверсирование шунтового двигателя (левый чертеж) и сериесного двигателя (правый чертеж).

§ 165. Электрическое торможение двигателей постоянного тока.

Электрическое торможение двигателей может совершаться трояким образом:

1) в виде полезного торможения, при котором совершается отдача электрической энергии в сеть, например, в случае горных железных дорог, подъемников и т. п.;

2) в виде реостатного торможения, при котором кинетическая энергия, запасенная в якоре двигателя, превращается в тепло в реостате;

3) в виде торможения обратным током, при котором вращающийся якорь машины переключается на обратный ход.

Полезное торможение. Торможение этого рода в двигателях шунтового возбуждения может быть осуществлено без всяких переключений схемы.

Шунтовой двигатель чисто автоматически может переходить на генераторную работу. [1]

Для того чтобы такая работа была возможна, необходимо,

[1] Например, при ходе подъемника вниз, при ходе электровоза под уклон и т. п.

чтобы противо-э. д. с. E якоря двигателя была больше напряжения U у зажимов, т. е. чтобы было

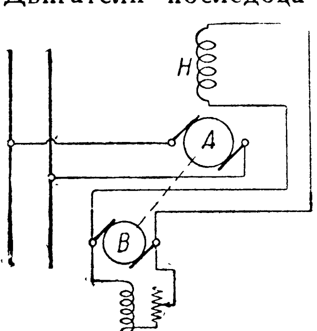
$$E > U.$$

Отдаваемый в сеть ток при этом можно регулировать, изменяя магнитный поток возбуждения и действуя, таким образом, на величину э. д. с. E:

$$I_a = \frac{E - U}{R_a}.$$

Последняя формула показывает: чем больше поток возбуждения, т. е. чем больше E, тем больше ток I_a, посылаемый машиной обратно в сеть.

Торможение этого вида может быть осуществлено только в двигателях шунтового возбуждения. Двигатели последовательного возбуждения не могут устойчиво работать в качестве генератора на сеть (см. гл. XXIII).



Фиг. 348. Электрическое торможение сериесного двигателя. A — якорь главного двигателя; B — возбудитель.

Поэтому при электрическом торможении на сеть такие двигатели обычно пересоединяются на независимое возбуждение, получая ток возбуждения от какого-либо местного источника э. д. с.

На фиг. 348 изображена схема электрического торможения двигателя последовательного возбуждения.

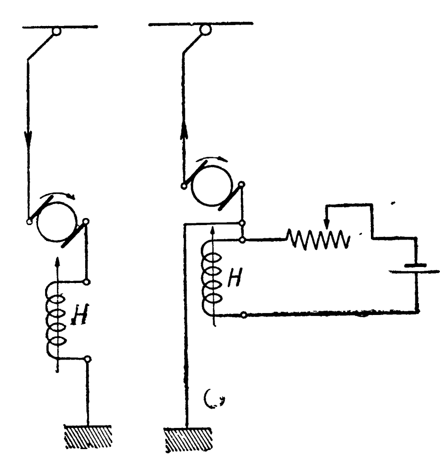
Как видно из этой фигуры, якорь двигателя A соединяется с сетью, обмотка же возбуждения H питается током небольшого возбудителя B шунтового возбуждения, сидящего на одном валу с главным двигателем. Так как сопротивление обмотки H вообще бывает невелико, то напряжение возбудителя B может быть очень небольшое (около 10% от сетевого напряжения). Вместо возбудителя B можно в цепь обмотки H включить аккумуляторную батарею, как показано на фиг. 349.

Реостатное торможение. Как было сказано выше, торможение, при котором происходит отдача электрической энергии в сеть (так называемое „полезное торможение"), может быть осуществлено только в машинах, имеющих шунтовое или независимое возбуждение. Полезное торможение двигателей последовательного возбуждения невозможно, так как последние не могут работать устойчиво в качестве сериесного генератора на сеть (см. гл. XXIII). Поэтому в этом случае приходится часто прибегать к менее выгодному с точки зрения экономии энергии методу — реостатному торможению.

Этот метод заключается в том, что двигатель отсоединяется от сети и, расходуя запасенную живую силу, работает в качестве генератора последовательного возбуждения на реостат,

производя, таким образом, торможение (вагона, подъемника и т. п.).

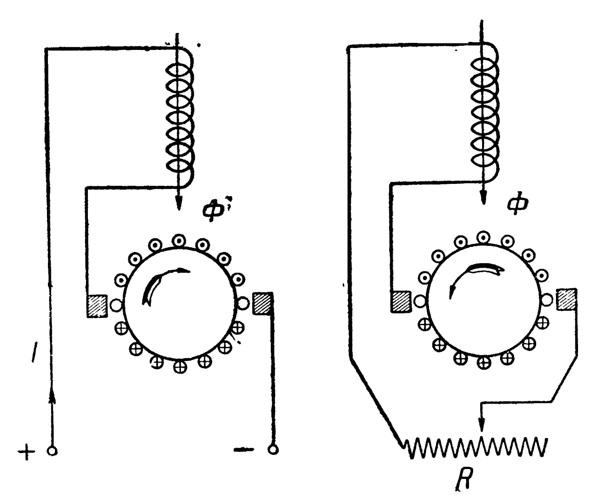
На фиг. 350 даны схемы соединения сериесного кранового двигателя при подъеме груза (левый чертеж) и при спуске, когда требуется торможение (правый чертеж); в последнем случае якорь начинает вращаться в обратную сторону и посылает ток в реостат R, благодаря чему вращение якоря тормозится.



Фиг. 349. Электрическое торможение сериесного двигателя (правый чертеж); нормальный ход (левый чертеж).

На фиг. 351 дана схема электрического торможения, применяемая в трамвайных двигателях, причем левый чертеж относится к случаю нормального хода моторов, получающих ток от троллейного провода, а правый чертеж — к случаю электрического торможения.

Сравнивая правый и левый чертежи этой фигуры, видим, что при тормозной схеме концы обмоток возбуждения *1*-*2* должны быть переключены для того, чтобы направление тока в обмотках возбуждения осталось прежнее и не произошло размагничивания машин.



Фиг. 350. Соединение сериесного кранового двигателя при подъеме (левый чертеж) и при спуске груза (правый чертеж).

В случае электрического торможения крановых двигателей в таком переключении нет необходимости, так как при спуске груза крановый двигатель меняет направление вращения (фиг. 350).

Реостатное торможение двигателей шунтового возбуждения не требует переключения обмоток возбуждения (фиг. 352).

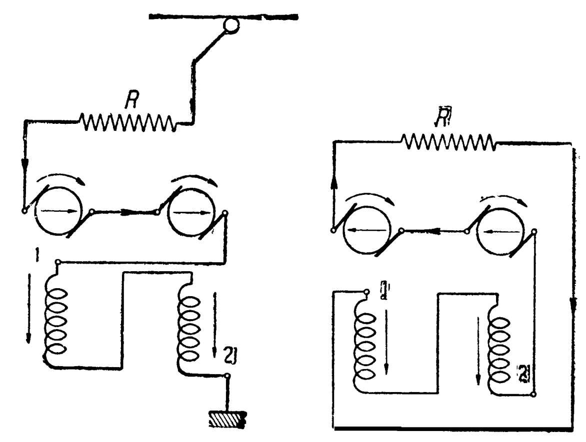
Торможение „о б р а т н ы м т о к о м“. Если изменить направление тока I_a на ходу двигателя в его якоре на о б р а т н о е, оставляя направление тока в обмотке возбуждения п р е ж н и м, то п р о и з о й д е т следующее (фиг. 353).

Двигатель будет вращаться некоторое время по инерции в прежнюю сторону, крутящий же момент после переключения будет действовать в направлении, обратном вращению.

Поэтому ход двигателя будет тормозиться.

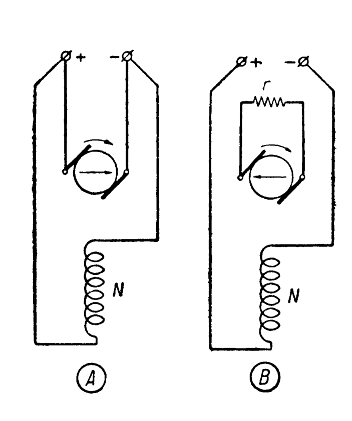
Ток, который будет протекать в обмотке якоря, пока длится процесс торможения, будет равен

$$I_a = \frac{U+E}{R_a}.$$



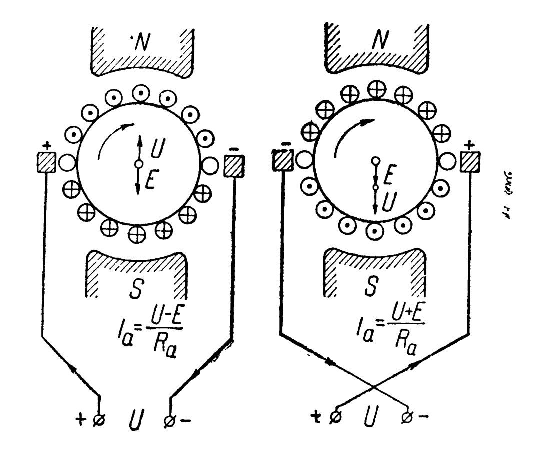
Фиг. 351. Нормальный ход (левый чертеж) и электрическое торможение (правый чертеж) трамвайных двигателей.

В числителе этого выражения стоит не разность, а сумма $U+E$, так как при этих условиях противо-э. д. с. E и напряжение у зажимов U действуют в одну и ту же сторону.



Фиг. 352. Электрическое торможение шунтового двигателя.

A—нормальный ход; *B*—торможение.



Фиг. 353. Торможение „обратным током" шунтового двигателя.

При этих условиях получается в якоре двигателя очень сильный толчок тока, имеющий результатом энергичное торможение двигателя.

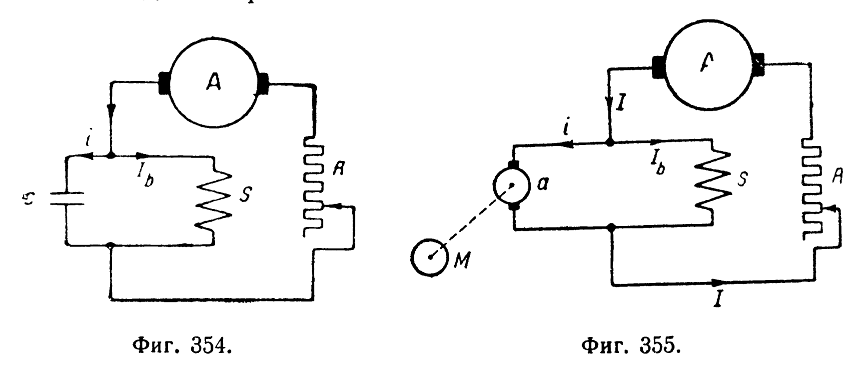
Благодаря тем большим напряжениям, которые получаются в материале двигателя при этом, такой метод торможения может применяться лишь в исключительных случаях.

§ 166. Реостатное торможение с „демпферной“ машиной. При резком толчкообразном изменении сопротивления в случае реостатного торможения получаются резкие толчки при движении электрического вагона или электровоза.

Этих „толчков“ можно было бы избежать в том случае, если бы поток тяговой машины, работающей генератором при торможении, изменялся достаточно плавно, несмотря на резкие колебания силы тока.

Этой цели можно было бы достичь путем параллельного приключения конденсатора *C* к зажимам обмотки возбуждения *S* тяговой машины. На фиг. 354 показана такая схема, в которой обозначают:

A — якорь тяговой машины;
S — ее обмотку возбуждения;
C — конденсатор.



Фиг. 354. Фиг. 355.

Вследствие малой величины напряжения на зажимах обмотки *S* (порядка нескольких вольт) размеры конденсатора *C* в такой схеме получились бы крайне большими.

Вместо конденсатора *C* можно к зажимам обмотки *S* приключить вращающийся вхолостую небольшой двигатель, как показано на фиг. 355.

Здесь означают:

a — якорь небольшого двигателя, приключенного к зажимам обмотки *S*;

M — маховик, сидящий на одном валу с двигателем *a*.

Заметим, что здесь якорь „демпферной“ машины *a* все время вращается в качестве мотора вхолостую, вращая маховик *M*, и что число оборотов в минуту этой машины устанавливается в зависимости от величины напряжения на зажимах обмотки *S*.

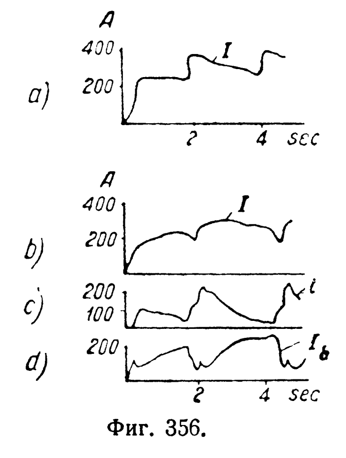
В этой схеме якорь машины *a* можно рассматривать как шунт, величина сопротивления которого автоматически меняется при резких изменениях тока в главной цепи якоря *A*.

Действительно, предположим, что при изменении сопротивления *R* произошло резкое изменение (скажем увеличение) тока *I*; при этом напряжение на зажимах обмотки возбуждения *S* также резко возрастет и число оборотов миниатюрного двигателя *a*

тоже должно будет возрасти. Однако в первый момент времени в якорь a при этом бросится сравнительно большой ток i, так как противо-э. д. с. этого якоря не будет теперь соответствовать возросшему напряжению на зажимах обмотки S. Однако спустя некоторое (небольшое) время, когда число оборотов якоря a возрастет до большей величины, соответствующей напряжению на зажимах обмотки S, ток i в якоре a снова упадет до почти прежней величины, а ток в обмотке возбуждения S в соответствующей мере увеличится. Из всего сказанного ясно, что якорь машины a на схеме фиг. 355 действует в смысле потребления тока таким образом, как если бы к зажимам обмотки S был приключен конденсатор очень большой емкости.

Емкость этого „конденсатора" a можно увеличивать или уменьшать, увеличивая или уменьшая вес маховика M, который сидит на одном валу с моторчиком a.[1]

Эта система была экспериментально установлена на метрополитене Берлина; на фиг. 356 показаны кривые, полученные из опыта. Верхний чертеж дает кривую изменения тока I тяговых машин при обычной схеме рекуперации (фиг 354). При схеме фиг. 355 кривая рекуперативного тока I имеет более плавный характер (фиг. 356, b). Кривая тока в якоре „демпферного" мотора i и кривая тока возбуждения I_b показаны на фиг. 356, c и d.



Фиг. 356.

§ 167. Регулирование скорости и электрическое торможение крановых двигателей. Для электрических кранов применяются, главным образом, двигатели последовательного возбуждения, характеристики которых являются наиболее подходящими для таких установок.

В электрическом оборудовании кранов обычно главное внимание бывает обращено на возможность получения плавного регулирования скорости двигателей при подъеме и на то, чтобы при спуске груза подъемный крюк крана не получал чрезмерно больших скоростей. Для этой цели электрическая схема должна быть скомбинирована таким образом, чтобы скорость движения груза при подъеме и спуске могла быть регулируема в широких пределах.

На фиг. 357 дана одна из весьма распространенных схем соединений кранового двигателя последовательного возбуждения, причем схемы *1*, *2*, *3*, ..., *6* относятся к подъему, а положения *I*, *II*, .., *IV* — к спуску груза; положение, отмеченное на фиг. 357 цифрой 0, соответствует ненагруженному состоянию двигателя.

---

[1] См. Elektrotechnische Zeitschrift, 1934, № 25.

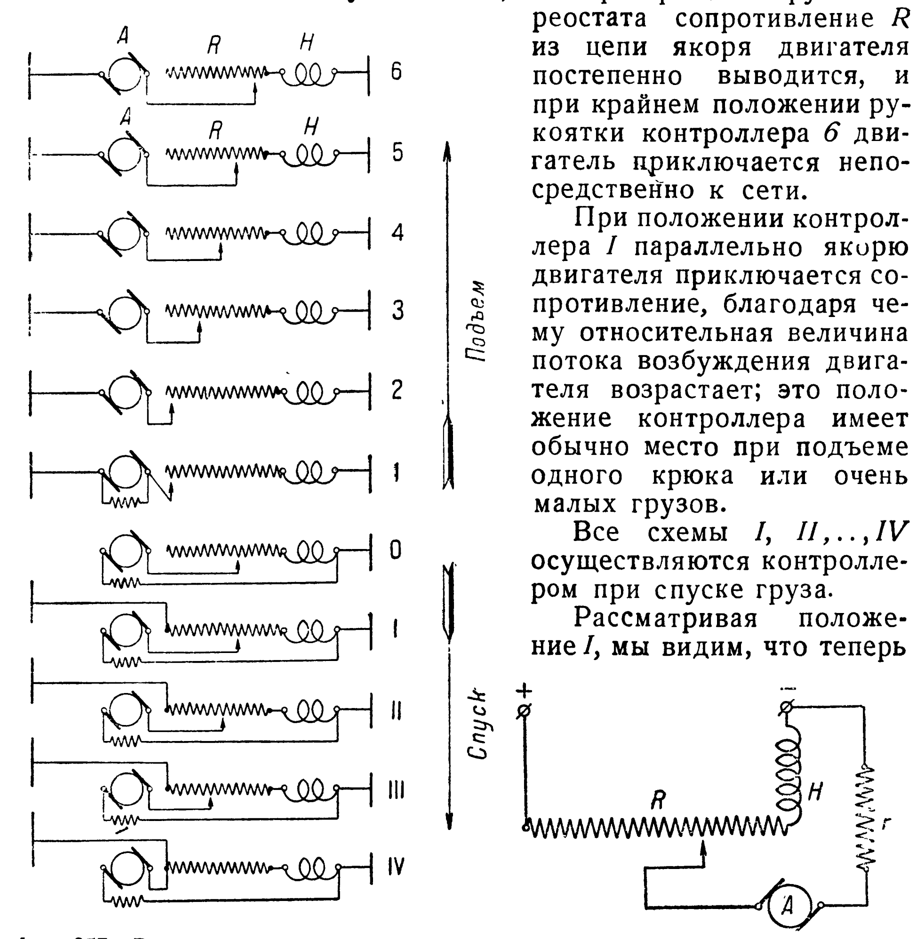
Все схемы, показанные на этой фигуре, осуществляются при помощи контроллера, не показанного на фигуре.

При положениях контроллера *2*, *3*,..,*6* якорь *А* кранового двигателя последовательно соединен с регулирующим реостатом *R* и обмоткой возбуждения *Н*; по мере вращения рукоятки реостата сопротивление *R* из цепи якоря двигателя постепенно выводится, и при крайнем положении рукоятки контроллера *6* двигатель приключается непосредственно к сети.

При положении контроллера *I* параллельно якорю двигателя приключается сопротивление, благодаря чему относительная величина потока возбуждения двигателя возрастает; это положение контроллера имеет обычно место при подъеме одного крюка или очень малых грузов.

Все схемы *I*, *II*,..,*IV* осуществляются контроллером при спуске груза.

Рассматривая положение *I*, мы видим, что теперь



Фиг. 357. Регулирование скорости кранового двигателя.

Фиг. 358. Торможение „обратным током“ (фиг. 356).

обмотка возбуждения и якорь двигателя посредством нескольких частей реостата соединены параллельно друг с другом; схема соединений, которая получается при этом, еще раз для наглядности изображена отдельно на фиг. 358.

В этой схеме обмотка возбуждения *Н* включается через сопротивление шунтом к обмотке якоря *А* таким образом, чтобы в момент спуска груза вращающий момент был направлен в сторону, обратную вращению двигателя; при этом получается так называемое торможение „обратным током“; если бы при этом

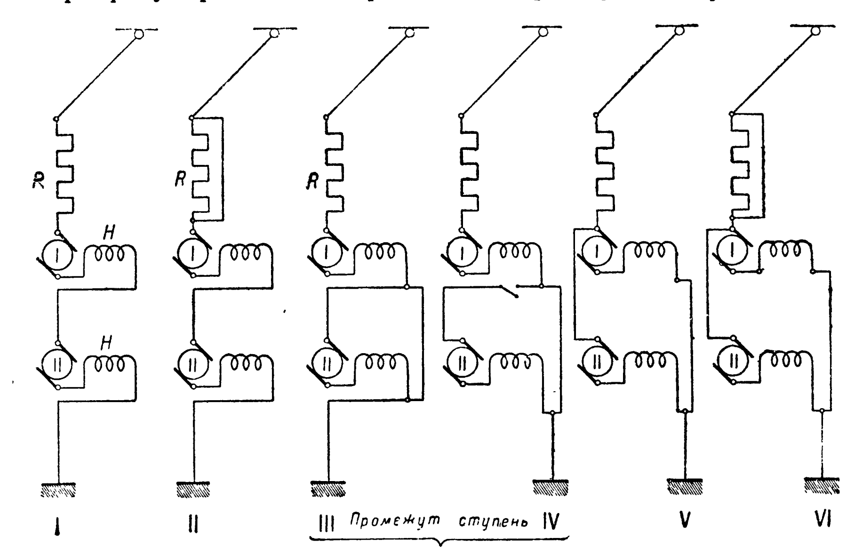
крюк крана случайно был совершенно разгружен, то двигатель стал бы вращаться в обратную сторону, производя подъем крюка.

§ 168. Регулирование скорости трамвайных двигателей. В трамваях с двумя тяговыми двигателями применяются два метода регулирования скорости:

последовательно-параллельное включение двигателей,

метод „моста Уитстона".

На фиг. 359 показана схема соединений трамвайных двигателей при регулировании скорости по первому методу.



Фиг. 359. Регулирование скорости трамвайных двигателей.

Как показывает эта фигура, имеются следующие положения рукоятки контроллера:

I. Оба двигателя *I* и *II* соединены последовательно с сопротивлением *R*.

II. Сопротивление *R* закорочено.

III. Включен в сеть через сопротивление *R* только двигатель *I*; двигатель *II* замкнут на короткое. Эта ступень является подготовительной к следующей, *IV*, ступени.

IV. Двигатель *II* выключен.

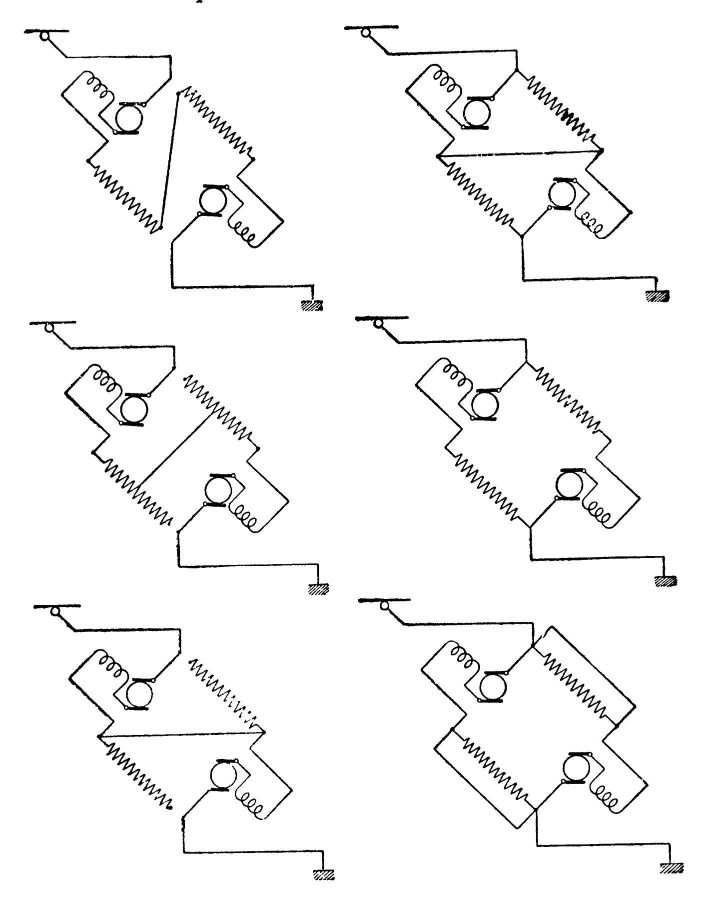
V. Оба двигателя *I* и *II* соединены параллельно и работают на сеть через сопротивление.

VI. Сопротивление закорочено; двигатели *I* и *II* работают параллельно.

Как видно из фиг. 359, при положениях контроллера *III* и *IV* работает только один двигатель *I*; благодаря этому обстоятельству тяговое усилие падает, что является недостатком этой схемы.

Этого недостатка можно избежать, применяя для регулирования скорости схему „моста Уитстона", как показано на фиг. 360.

Как видно из этой фигуры, оба трамвайных двигателя при всяких положениях контроллера все время приключены к сети в отличие от схемы фиг. 359.



Фиг. 360. Метод „моста" Уитстона" для регулирования скорости трамвайных двигателей.

§ 169. Совместная работа двигателей шунтового и последовательного возбуждений. 1. Предположим, что шунтовой двигатель *I* и сериесный двигатель *II* (якори которых сидят на одном валу) соединены между собой последовательно (фиг. 361).

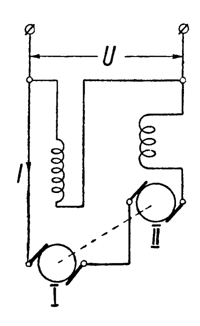
При этой схеме с увеличением нагрузки напряжение на зажимах двигателя последовательного возбуждения U_{II} будет возрастать, а напряжение на зажимах шунтового двигателя U_I будет убывать (фиг. 362): U_I изменяется прямо пропорционально скорости агрегата n; поэтому кривая U_I в некотором масштабе может изображать кривую скорости агрегата.

Как видно из фиг. 362, кривая скорости агрегата n сходна по своей форме с таковой для двигателя смешанного возбужде-

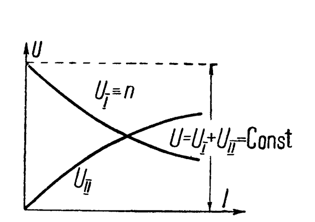
ния. Таким образом мы видим, что при изменении нагрузки на валу двигателей *I* и *II*, соединенных согласно фиг. 361, все явления будут происходить таким образом, как если бы мы имели дело с двигателем смешанного возбуждения.

2. При параллельном соединении шунтового двигателя *I* и сериесного *II*, сидящих на одном валу (фиг. 363), получается следующее:

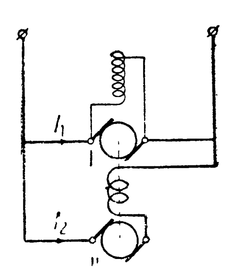
Двигатель *I*, имеющий шунтовое возбуждение, принужден все время работать с п р и б л и з и т е л ь н о п о с т о я н н о й с к о р о с т ь ю, несмотря на изменение нагрузки на его валу. Так как с двигателем *I* сцеплен двигатель *II*, то последний тоже будет вращаться с постоянной скоростью ($n \approx \mathrm{const}$).



Фиг. 361. Последовательное соединение шунтового двигателя *I* и сериесного двигателя *II*.



Фиг. 362. Кривые изменения напряжений U_1 и U_2 на зажимах двигателей, соединенных по схеме фиг. 361.

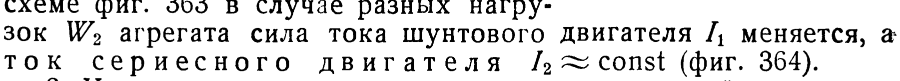


Фиг. 363. Параллельное соединение шунтового двигателя *I* с сериесным *II*.

При постоянной величине напряжения сети противо-э. д. с. сериесного двигателя (равно как и шунтового) все время должна оставаться приблизительно постоянной; при $n \approx \mathrm{const}$ последнее возможно только в том случае, когда $\Phi \approx \mathrm{const}$, т. е. когда ток двигателя последовательного возбуждения приблизительно постоянен.

Фиг. 364.

Таким образом оказывается, что при схеме фиг. 363 в случае разных нагрузок W_2 агрегата сила тока шунтового двигателя I_1 меняется, а ток с е р и е с н о г о д в и г а т е л я $I_2 \approx \mathrm{const}$ (фиг. 364).



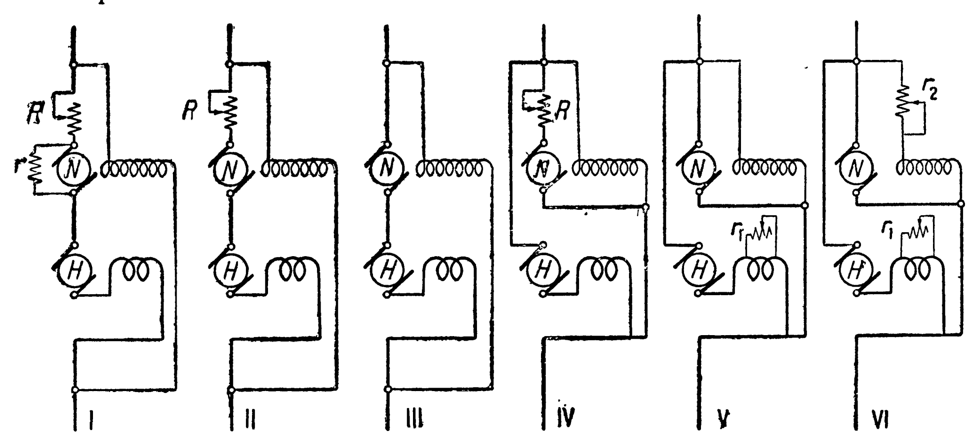
3. Указанные выше схемы соединения двигателей шунтового и последовательного возбуждения иногда применяются для приведения в действие б у м а ж н ы х м а ш и н, где требуется очень большая степень регулировки скорости. На фиг. 365 показаны схемы соединения шунтового двигателя *N* и сидящего на одном

валу с ним двигателя-сериес H, которые осуществляются контроллером при регулировке скорости.[1]

Схема I осуществляется при пуске в ход; в этом случае машины N и H соединяются последовательно, причем в главную цепь включен реостат R, и якорь N замкнут на сопротивление r. В этом случае шунтовой мотор N действует как генератор и тормозит ход всего агрегата. Размыкая реостат r, мы увеличиваем скорость агрегата (см. положение II).

Для дальнейшего увеличения скорости необходимо выключить реостат R (см. положение III).

При следующей, IV, ступени двигателя N и H соединяются параллельно, причем последовательно с машиной N включается сопротивление R.



Фиг. 365. Схема соединений сериесного H и шунтового N двигателей для регулировки скорости.

В последней ступени VI в цепь шунта машины N включается сопротивление r_2, и, кроме того, обмотка возбуждения двигателя H шунтируется сопротивлением r_1.

При этой последней схеме благодаря шунтировке обмотки возбуждения сериесного двигателя почти всю нагрузку берет на себя шунтовой двигатель N, и весь агрегат работает примерно так, как двигатель шунтового возбуждения. Эта схема регулировки применяется сравнительно редко.

ГЛАВА ДВАДЦАТЬ ВТОРАЯ

ДРУГИЕ МЕТОДЫ ПУСКА В ХОД И РЕГУЛИРОВАНИЯ СКОРОСТИ ДВИГАТЕЛЕЙ

§ 170. Схема Леонарда. Выше был описан метод регулирования скорости двигателей постоянного тока, заключающийся в изменении напряжения на зажимах при помощи реостата,

[1] См. Elektrische Kraftbetriebe und Bahnen, 1906, стр. 359.

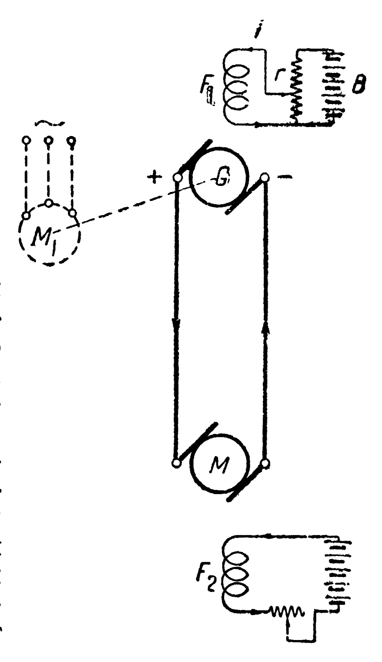
соединенного последовательно с якорем. Однако, как мы видели, этот метод обладает двумя существенными недостатками: при нем получаются значительные колебания скорости двигателя при изменении его нагрузки, и к. п. д. всей установки понижается.

Изменение напряжения на зажимах двигателя можно осуществить и другим более совершенным методом, при котором получается устойчивая работа двигателя и к. п. д. установки не понижается заметным образом.

Этот метод был впервые предложен Леонардом.[1]

Идею схемы Леонарда можно уяснить себе из фиг. 366.

Двигатель M независимого возбуждения получает питание от генератора G, вращаемого двигателем M_1. Последний может быть постоянного или (как это чаще всего бывает) переменного тока.



Фиг. 366. Схема Леонарда.

Как видно из фиг. 366, характерным в схеме Леонарда является то, что якорь двигателя M и соединенный с ним якорь генератора G представляют собой замкнутую цепь, которую при нормальной работе не приходится размыкать. Второй характерной чертой этой схемы является то, что в цепь якоря двигателя M и генератора G не включен реостат. В таком реостате нет надобности, так как пуск в ход двигателя M производится при пониженном напряжении генератора G. Напряжение генератора G можно регулировать от нуля до нормальной величины, изменяя ток возбуждения i, текущий в обмотке электромагнитов F_1 генератора.

Двигатель M имеет независимое возбуждение.

Меняя напряжение генератора G от нуля до некоторой конечной величины, мы имеем возможность тем самым регулировать число оборотов двигателя M от нуля до нормальной величины.

Таким образом мы видим, что при схеме Леонарда между сетью и двигателем имеется промежуточное звено в виде двигателя генератора. Двигательно-генераторную установку можно в данном случае рассматривать как своего рода подстанцию, обслуживающую двигатель.

§ 171. Регулирование скорости при помощи вольтодобавочной динамомашины. В тех случаях, когда имеется на станции в распоряжении не трехфазный, а постоянный ток, для целей

---

[1] Первые литературные сведения об этом методе относятся к 1892 г. (см. Trans. of American Institute of Electrical Engineers, June 1892).

широкой регулировки скорости двигателя можно применять также другую систему регулирования, основанную на применении вольтодобавочной динамомашины.

При этой системе напряжение на зажимах мотора можно регулировать в широких пределах путем изменения напряжения вольтодобавочной машины.

На фиг. 367 дана схема соединений при регулировании по этому методу.

Здесь означают:

L — сеть постоянного тока напряжения U;

M — двигатель, скорость которого необходимо регулировать;

G_1 — вольтодобавочная машина;

F_1 — ее обмотка возбуждения;

R — регулирующий реостат и переключатель;

M_1 — двигатель, вращающий динамомашину G_1.

Фиг. 367. Регулирование скорости двигателя M при помощи вольтодобавочного генератора G_1.

При соответственной полярности вольтодобавочной машины G_1 на зажимах главного двигателя M действует сумма напряжений сети и вольтодобавочной машины $U+U_1$; изменив направление тока возбуждения в обмотке F_1 на обратное, мы тем самым изменим полярность вольтодобавочной машины G_1, и в результате теперь на клеммах главного двигателя будет напряжение $U-U_1$.

Если максимальное напряжение вольтодобавочной машины U_1 равно напряжению сети U, то такой метод позволит изменять напряжение на зажимах главного двигателя M в пределах от $2U$ до нуля.

Так как при этих условиях напряжение добавочной машины G_1 равно лишь половинной величине максимального напряжения, которое может действовать на зажимах главного двигателя M, то размеры машины G_1 должны соответствовать лишь половинной мощности главного двигателя M.

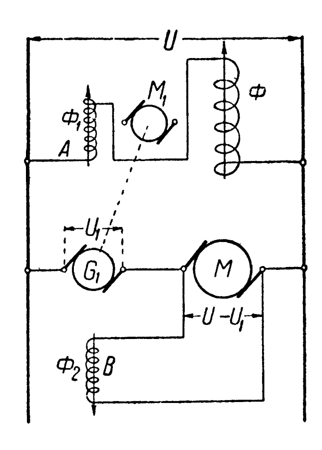
§ 172. Автоматический пуск в ход двигателей постоянного тока при посредстве вольтодобавочной машины. Описанная выше схема (фиг. 367) может быть видоизменена таким образом, что пуск в ход двигателя будет совершаться **автоматически**.

Для этой цели в схеме фиг. 367 необходимо сделать небольшое изменение: необходимо дать вольтодобавочной машине G_1 двойное возбуждение. На фиг. 368 изображена такая схема.

На этой схеме обозначают:

M — главный двигатель;
G_1 — вольтодобавочная машина;
M_1 — двигатель, вращающий вольтодобавочную машину;
A и B — обмотки возбуждения вольтодобавочной машины;
Ф — поток возбуждения мотора M_1.

Как видно из фиг. 368, обмотка возбуждения A вольтодобавочной машины приключена к постоянному напряжению U, а обмотка B — к переменному напряжению, которое имеется между щетками главного двигателя M.



Фиг. 368. Автоматический пуск в ход двигателя при помощи вольтодобавочного агрегата.

Обмотки A и B соединены друг против друга так, что поток $Ф_2$ направлен противоположно потоку $Ф_1$.

При пуске в ход напряжение между щетками главного двигателя M невелико, поэтому размагничивающий поток $Ф_2$ тоже невелик; в результате напряжение на щетках U_1 вольтодобавочной машины G_1 (вращаемой двигателем M_1 с приблизительно постоянной скоростью) велико; таким образом при пуске в ход почти все напряжение сети U поглощается в якоре вольтодобавочной машины G_1, вращающейся с приблизительно постоянной скоростью, и на коллектор якоря двигателя M приходится лишь небольшой остаток $U - U_1$ (фиг. 368).

При возрастании скорости вращения двигателя M картина меняется: напряжение на коллекторе M возрастает, вследствие чего также возрастает размагничивающий поток $Ф_2$ вольтодобавочной машины (фиг. 369); в результате напряжение U_1 на коллекторе G_1 падает, и напряжение $U - U_1$, приходящееся на коллектор M, возрастает.

Фиг. 369.

Таким образом по мере раскручивания двигателя M напряжение на его коллекторе автоматически возрастает.

Когда наступит момент $Ф_2 = Ф_1$, напряжение на коллекторе вольтодобавочной машины будет $U_1 = 0$, и на коллекторе главного двигателя M будет полное напряжение сети U.

§ 173. „Буферные" схемы для выравнивания переменных нагрузок. В некоторых установках нагрузка двигателей носит сильно переменный характер; например, двигатель, вращающий прокатный стан, нагружается при проходе через вальцы болванки и разгружается полностью при выходе болванки из-под вальцов стана. Возникающие при этом резкие колебания нагрузки

(„толчки тока") вредно отражаются на работе центральной станции, питающей установку.

Был предложен ряд электрических схем, при которых можно добиться смягчения этих толчков тока; ниже приводится описание некоторых из них.

Схема Тальмайера. На фиг. 370 изображена схема, предложенная в свое время Тальмайером.

На этой фигуре означают:

D — главная динамомашина, вращаемая асинхронным двигателем A;

D_1 — вспомогательная машина с маховиком;

M — двигатель постоянного тока.

На схеме для простоты обмотки возбуждения машин D, D_1 и M не показаны; эти машины могут иметь шунтовое или смешанное возбуждение.

Действие схемы заключается в следующем: при равномерной нагрузке мотора M машина D работает генератором и питает обе машины D_1 и M, работающие в качестве двигателей.

При резком изменении (например, увеличении) нагрузки двигателя M ток, притекающий к его якорю, соответственно возрастает, в результате чего напряжение машины D уменьшается; при этом машина D_1 благодаря инерции маховика продолжает некоторое время вращаться *почти с прежней скоростью*, и вследствие этого ее противо-э. д. с. *сохраняет прежнее значение*. Таким образом противо-э. д. с. вспомогательной машины D_1 делается больше напряжения генератора D, в результате чего машина D_1 перестает быть двигателем и в качестве генератора, расходуя кинетическую энергию, запасенную в маховике, питает двигатель M.

Таким образом в этот момент времени *обе машины* D и D_1 *работают параллельно в качестве генераторов, питая сообща двигатель* M. При убывании нагрузки двигателя M снова наступает прежнее положение, при котором машина D работает как генератор, питая оба параллельно соединенные между собой двигатели D_1 и M, причем двигатель D_1 достигает прежней скорости, запасая кинетическую энергию в маховике.

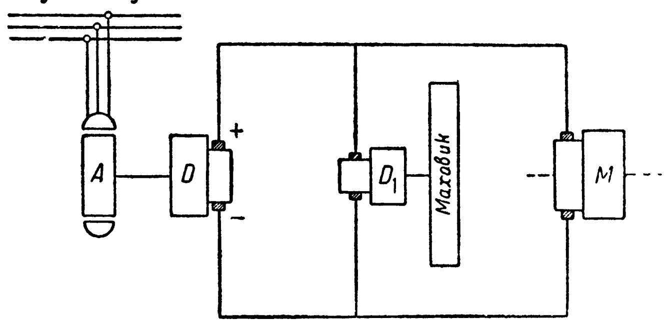
Таким образом можно сказать, что маховик, сидящий на одном валу с двигателем D_1, является своего рода *аккумулятором кинетической энергии*.

При малых нагрузках двигателя M этот „аккумулятор" *заряжается* и при толчкообразном увеличении нагрузки двигателя M *разряжается*, возвращая накопленную кинетическую энергию двигателю M.

Схема Ильгнера. Маховичный преобразователь. Описанную выше схему Тальмайера (фиг. 370) можно упростить, соединив генератор D и двигатель D_1 с маховиком в одно целое. В этом случае получится схема Ильгнера, изображенная на фиг. 371.

При сравнении схемы Ильгнера со схемой Леонарда на первый взгляд может показаться, что обе схемы отличаются друг от друга лишь весьма несущественно: в схеме Ильгнера имеется маховик, которого нет в схеме Леонарда.

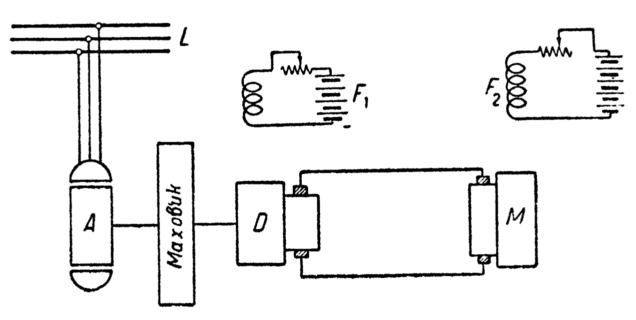
При ближайшем, однако, рассмотрении оказывается, что наличие маховика в схеме Ильгнера вносит значительное улучшение в эту схему.



Фиг. 370. Схема Тальмайера.

Для выяснения роли маховика в схеме Ильгнера обратимся к фиг. 371.

Как видно из этой фигуры, двигатель *M* получает электрическую энергию от генератора *D* с маховиком, приводимого во вращение асинхронным двигателем *A*. Действие этой схемы заключается в следующем:



Фиг. 371. Схема Ильгнера.

При внезапном увеличении нагрузки двигателя *M* нагрузка генератора *D* соответственным образом возрастает, и скорость вращения двигатель-генератора *AD* слегка уменьшается; при этом маховик начинает расходовать запасенную в нем кинетическую энергию, начинает, так сказать, „разряжаться".

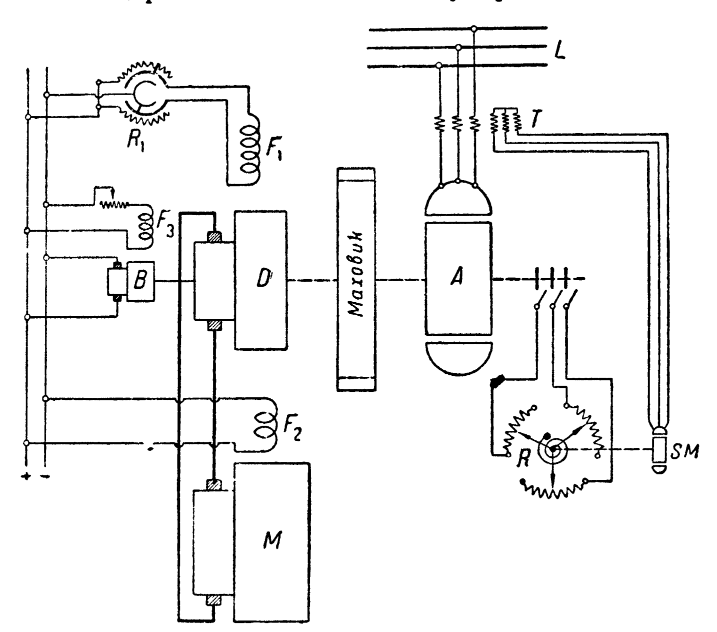
В этот момент времени мощность к генератору *D* подводится двояким образом: частью от двигателя *A* и частью от маховика отдающего часть своей кинетической энергии.

При внезапном уменьшении нагрузки двигателя *M* явление протекает обратным путем: генератор *D* разгружается, ско-

рость агрегата начинает **возрастать**, в результате чего кинетическая энергия маховика начинает увеличиваться — происходит „заряд“ маховика.

Таким образом мы видим, что главная роль маховика схемы Ильгнера заключается в уменьшении „толчков тока“ в сети *L*, вызываемых неравномерной нагрузкой двигателя *M* (фиг. 371).

В настоящее время можно часто встретить прокатные станы, в которых максимальная („пиковая“) нагрузка достигает величины 20000 *л. с.* и выше, в то время как средняя нагрузка централи благодаря действию маховика удерживается всего в пре-



Фиг. 372. Схема „маховичного“ преобразователя Ильгнера.

делах 3000—4000 *л. с.* Схема Ильгнера известна в литературе под именем „маховичного преобразователя“ („Schwungrad Umformer“).

Полная схема установки Ильгнера. На фиг. 372 изображена полная схема установки Ильгнера.

На этой фигуре обозначены через:

A — асинхронный двигатель, получающий питание от трехфазной сети *L*;

R — регулировочный реостат, включенный в цепь ротора;

SM — сервомотор — небольшой двигатель, который может поворачивать рукоятку реостата *R*;

T — трансформатор главного тока, питающий сервомотор *SM*;

D — генератор постоянного тока;

M — двигатель постоянного тока, получающий питание от генератора *D*;

B — возбудитель, питающий обмотки возбуждения F_1, F_2 и F_3;
R_1 — реостат-переключатель для регулировки и изменения направления тока в обмотке возбуждения F_1.

Особенностью этой схемы по сравнению со схемой фиг. 371 является наличность в цепи ротора асинхронного двигателя *A* регулируемого реостата *R*. Величина введенного в цепь ротора сопротивления *R* регулируется сервомотором *SM* таким образом, что при возрастании тока, питающего двигатель *A*, это сопротивление увеличивается, и наоборот.

Цепь включения такого сопротивления следующая:

При возрастании тока благодаря наличности сопротивления *R* скорость двигателя *A* уменьшается, в результате чего маховик получает возможность сильнее „разрядиться", т. е. отдать часть запасенной в нем кинетической энергии генератору *D*, разгружая, таким образом, сеть *L* от чрезмерного „толчка тока".

§ 174. Схемы для пуска в ход и регулирования скорости больших двигателей. (Увеличение быстроты изменения магнитного потока возбуждения больших машин). В некоторых случаях (например, при питании реверсивных двигателей, приводящих в движение прокатные станы) требуется, чтобы динамомашина, питающая установку, могла достаточно быстро изменять величину своего напряжения и его полярность.

Однако обмотка электромагнитов возбуждения больших машин обычно имеет очень большую самоиндукцию, благодаря чему процесс изменения величины магнитного потока в таких машинах обычно протекает относительно медленно.

Можно в значительной мере ускорить изменение магнитного потока возбуждения при помощи схемы, изображенной на фиг. 373.[1]

На этой фигуре означают:

G — генератор постоянного тока (вращаемый асинхронным двигателем *A*); генератор *G* питает двигатель *M*; напряжение на зажимах последнего, равно как и полярность во время прокатки, должны периодически меняться;

2 — обмотка возбуждения генератора;

3-5 — главный и дополнительный возбудитель динамомашины постоянного тока, сидящие на одном валу с двигателем *11*, приводящим их во вращение;

4 и *6* — обмотки возбуждения;

1 — аккумуляторная батарея, питающая посредством реостата-переключателя *10* обмотки возбуждения *4* и *6*;

7 — небольшой двигатель независимого возбуждения, сидящий на одном валу с маховичком *8*.

Самой характерной частью этой схемы является указанный в схеме небольшой двигатель *7*.

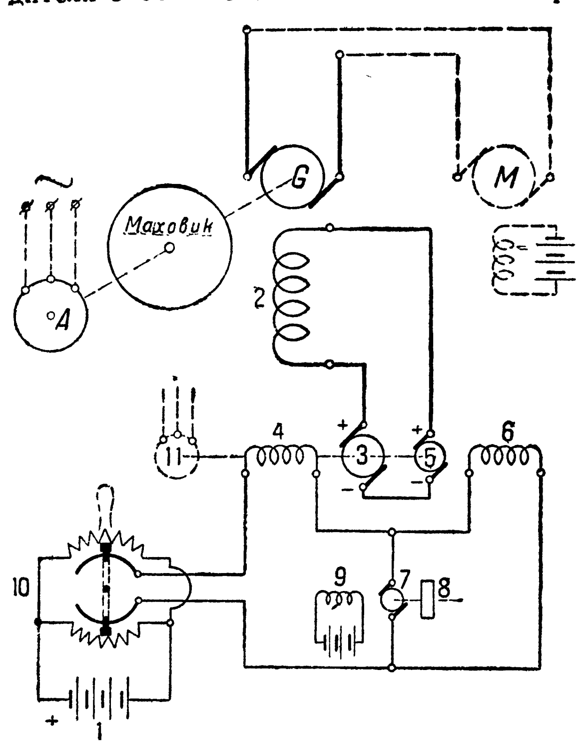
Этот двигатель здесь содействует увеличению скорости изменения тока в обмотке *2* главной динамомашины *G* при манипуляциях рукояткой реостата *10*.

---

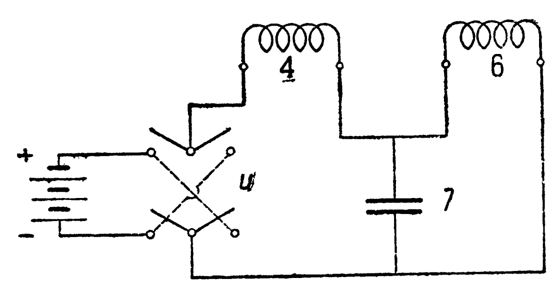
[1] См. Brown-Boveri, Die Mitteilungen, 1924, стр. 256.

Действие вспомогательного двигателя 7 заключается в следующем:

При нормальном ходе напряжение дополнительного возбудителя 5 обычно вычитается из напряжения главного возбудителя 3. При быстром изменении направления тока возбуждения машин 3 и 5 с помощью манипулятора 10 полярность главного возбудителя 3 изменяется, и в соответствии с этим направление тока в обмотке возбуждения 2 главной динамомашины тоже меняется; при этом вспомогательная машина 7 благодаря инерции продолжает некоторое время вращаться в прежнюю сторону; результатом этого является то, что ток в обмотке 6 продолжает сохранять прежнее направление (так как обмотка 6 при этом получает питание от вращающейся по инерции в прежнюю сторону вспомогательной машины 7).



Фиг. 373. Схема Леонарда. Метод ускоренного изменения магнитного потока генератора G.

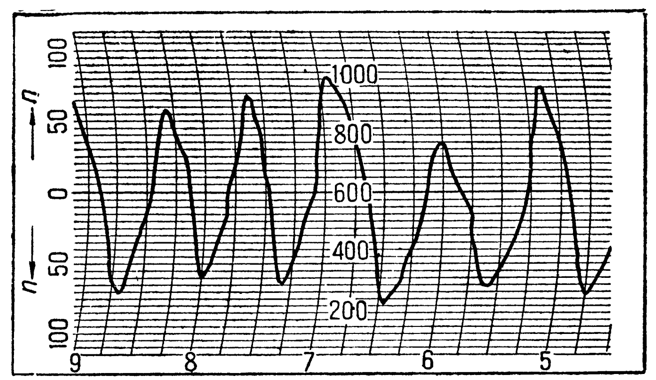


Фиг. 374. Эквивалентная схема, поясняющая действие вспомогательной машины 7 с маховиком на схеме фиг. 373.

Таким образом в этот момент времени э. д. с. машин 3 и 5 действуют в одну и ту же сторону и поэтому увеличивают скорость изменения тока в электромагнитах 2 главной машины G.

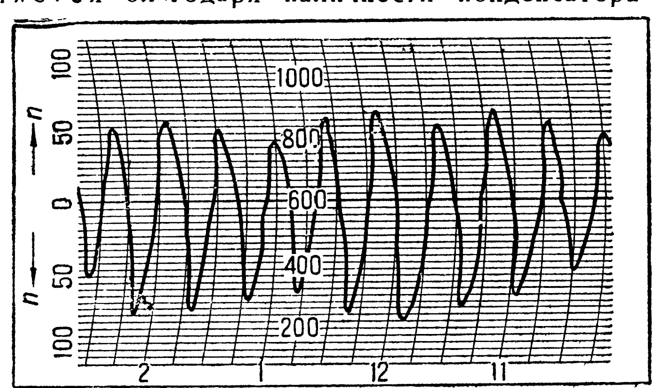
По истечении некоторого времени, когда машина 7 уже успеет изменить направление своего вращения, ток в обмотке возбуждения 6 тоже изменит свое направление и в соответствии

с этим э. д. с. возбудителей *3* и *5*, как и раньше, будут вычитаться друг из друга, с той только разницей, что теперь результирующая э. д. с. машин *3* и *5* будет направлена в обратную по сравнению с предыдущим случаем сторону.



Фиг. 375. Число перемен хода в минуту при обычной схеме.

Действие машины *7* вышеописанной схемы сходно с действием некоторого конденсатора, включенного в цепь, показанную на фиг. 374. В этой цепи при изменении направления тока с помощью переключателя *U* изменение тока в катушке *6* замедляется благодаря наличности конденсатора *7*; в ка-



Фиг. 376. Число перемен хода в минуту при питании возбуждения согласно новой схеме по фиг. 373.

тушке *4* изменение тока ускоряется под влиянием емкости *7*, компенсирующей самоиндукцию катушки *4*.

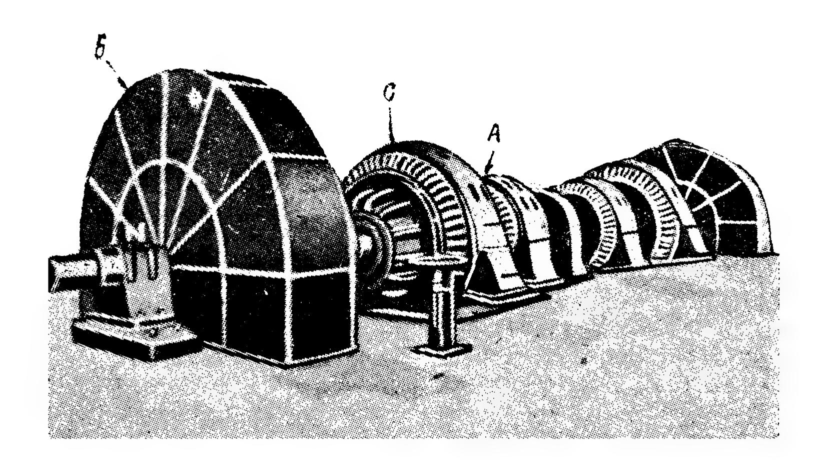
Действие вспомогательной машины *7* с маховиком схемы фиг. 373 сходно с действием конденсатора схемы фиг. 374.

Динамомашину *7* на фиг. 373 с этой точки зрения уместно было бы назвать „электромагнитным конденсатором".

Благодаря схеме фиг. 373 э. д. с. самоиндукции, которая наводится в обмотке возбуждения *2* при изменении в ней величины тока, преодолевается напряжением возбудителей *3* и *5*;

вследствие этого возможно относительно быстрое реверсирование мощных двигателей, приводящих в движение прокатные станы.

Для иллюстрации на фиг. 375 и 376 изображены две тахограммы: фиг. 375 относится к случаю обычной схемы питания двигателя; фиг. 376 получена для двигателя той же мощности, но питаемого согласно схеме фиг. 373. Из сравнения этих двух кривых видно, что при новой схеме имеется возможность осуществить значительно большее число реверсирований прокатного двигателя в единицу времени, чем при старых схемах.



Фиг. 377. Два „маховичных" преобразователя Ильгнера.

A—асинхронный двигатель; *G*—генератор постоянного тока; *S*—маховик в кожухе.

На фиг. 377 дана фотография двух агрегатов Ильгнера. На этой фигуре означают: *S* — маховик, закрытый кожухом, *G* — генератор постоянного тока и *A* — асинхронный двигатель, вращающий весь агрегат. [1]

---

[1] Окружная скорость маховиков в агрегате Ильгнера обыкновенно бывает очень большой, достигая часто 100—110 m/sec Для уменьшения потерь на трение о воздух, которые при таких больших окружных скоростях могут достигать весьма внушительных величин, обычно маховик Ильгнера совершенно закрывается кожухом.

Благодаря такой мере удается понизить вихревые воздушные потери на 30%. Были сделаны попытки дальнейшего уменьшения потерь на трение, заключающиеся в том, что пространство внутри кожуха, где вращается маховик, заполнялось каким-либо легким газом, например, водородом; кроме того, пробовали устанавливать в пространстве внутри кожуха, где находится маховик, для уменьшения трения некоторое разрежение. Однако здесь пришлось натолкнуться на затруднения, связанные с невозможностью получить хорошее уплотнение, которое могло бы воспрепятствовать просачиванию воздуха из внешней среды.

ГЛАВА ДВАДЦАТЬ ТРЕТЬЯ

РЕКУПЕРАЦИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ ПРИ ТЯГЕ НА ПОСТОЯННОМ ТОКЕ

§ 175. Введение. Ввиду значительного развития электрических железных дорог дальнего следования, работающих на постоянном токе высокого напряжения, вопросы рекуперации электрической энергии на этом роде тока начинают в настоящее время приобретать большую актуальность.

Как известно, возвращение неиспользованной энергии электровоза при ходе под уклон обратно в сеть (рекуперация) наиболее просто могло бы быть осуществлено, если бы в качестве тяговых двигателей были бы применены двигатели шунтового возбуждения.

Однако в настоящее время, как известно, для целей тяги почти исключительно применяются двигатели последовательного возбуждения, обладающие лучшими тяговыми характеристиками.

В случае тяговых двигателей последовательного возбуждения схемы рекуперации получаются значительно сложнее, так как при этих условиях в момент рекуперации приходится изменять возбуждение двигателей, применяя вместо сериесного шунтовое или независимое и питая обмотки двигателей в этот момент от батареи или какого-нибудь генератора постоянного тока.

Наибольшие трудности, которые приходится преодолевать при этом, связаны с теми „толчками тока" при рекуперации, которые могут возникнуть при колебаниях напряжения сети.

Целесообразные рекуперативные схемы должны давать возможность смягчения этих „толчков тока" до безопасных пределов.

§ 176. Условия устойчивости при электрическом торможении. Одно из основных условий, которым должна удовлетворять всякая система электрического торможения, — это устойчивость системы; последняя требует, чтобы электрическое торможение автоматически возрастало при возрастании скорости вагона.

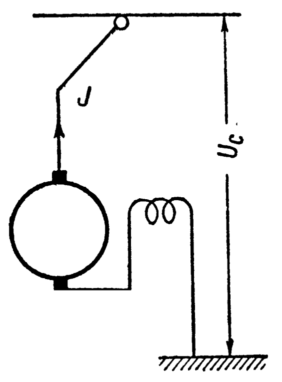
При двигателях последовательного возбуждения возможен только один вид электрического торможения — реостатный; полезное торможение с отдачей энергии обратно в сеть при сериесном возбуждении возможно только при весьма повышенном токе, близком к току короткого замыкания.

На фиг. 378 показана схема генератора последовательного возбуждения, питающего током I сопротивление r. Кривая изменения напряжения генератора U в функции тока I для этого случая показана на фиг. 380. На этой же фигуре дана кривая э. д. с E, отличающаяся от U на величину падения $I\ (R_a + R_s)$.

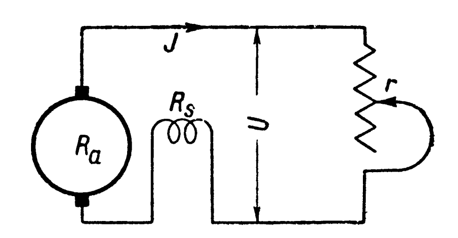
Если включить сериесный генератор на сеть согласно фиг. 379, то явление, происходящее в таком генераторе, можно изучить при помощи фиг. 381. На фиг. 381 изображена кривая изменения напряжения U сериесного генератора и прямая, проведен-

ная параллельно оси *1-2* на расстоянии U_0, равном напряжению сети. Эта параллель пересекает кривую U в точках *1* и *2*, таким образом мы видим, что ток, посылаемый в сеть сериесным генератором, может быть равен I_1 или I_2. Будет ли сериесный генератор при таком значении тока I_1 или I_2 работать устойчиво?

Сначала изучим режим, характеризуемый точкой *1* и током I_1. Можно доказать, что этот режим будет неустойчивым. Действительно, предположим, что по какой-либо причине ток I машины слегка уве-

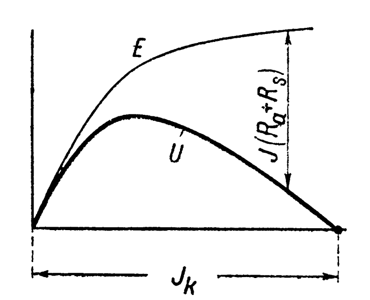


Фиг. 379. Схема включения сериесного генератора при использовании земли вторым проводом.

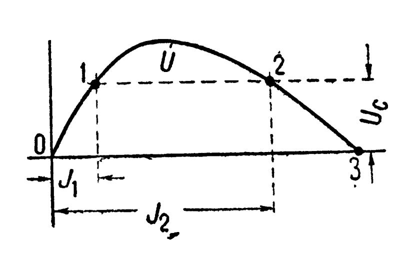


Фиг. 378. Схема генератора последовательного возбуждения.

личился и стал больше I_1, это увеличение тока тотчас повлечет за собой увеличение потока, а следовательно, и э. д. с. сериесного генератора, последнее вызовет соответственное дальнейшее увеличение потока и э. д. с., что в свою очередь послужит причиной увеличения тока и т. д.



Фиг. 380. Кривая изменения напряжения сериесного генератора для схемы фиг. 378.



Фиг. 381. Кривая изменения напряжения сериесного генератора для схемы фиг. 380.

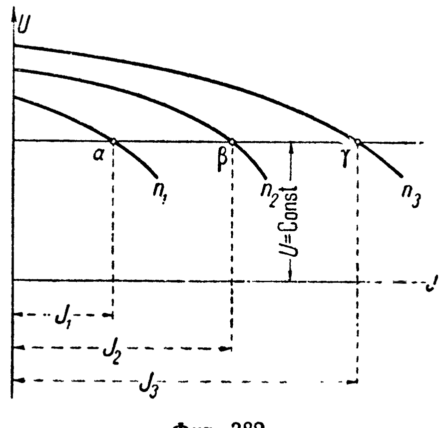
Мы видим, что процесс здесь будет неустойчивым. Вышеописанный процесс нарастания тока будет продолжаться до тех пор, пока ток не достигнет значения I_2. Нетрудно доказать, что режим, характеризуемый током I_2 и точкой *2* диаграммы фиг. 381, является вполне устойчивым.

Действительно, предположим, что ток машины почему-либо стал больше I_2. В этом случае, как видно из фиг. 381, напряже-

ние машины понизится и станет меньше, чем напряжение сети U, что немедленно вызовет соответствующее уменьшение тока. Таким образом машина будет устойчиво работать с током рекуперации I_2.

Из изложенного видно, что правая нисходящая часть кривой *2-3* будет характеризовать устойчивую работу и левая *0-1* — восходящая часть кривой — неустойчивую работу сериесного генератора (фиг. 381).

Однако, к сожалению, рекуперация на участке *2-3* большого практического значения не имеет, так как ток рекуперации здесь получается чрезмерно большим и к. п. д. оказывается очень низким.



Фиг. 382.

Ток рекуперации I_2 можно было бы снизить путем включения сопротивления в цепь сериесной машины, однако при этом мы снизили бы еще больше и без того ничтожный к. п. д. регенеративной схемы по фиг. 381.

Таким образом из всего сказанного следует, что практического значения рекуперация электрической энергии при последовательном возбуждении машин не имеет. По причинам, изложенным выше, все известные современные рекуперативные схемы требуют перевода тяговых машин при работе их в качестве генераторов с сериесного на шунтовое или независимое возбуждение.

Таким образом отсюда ясно следующее: **сериесные машины в качестве генераторов могут устойчиво работать только при реостатном торможении, при рекуперации же устойчивая работа невозможна.**

Для того чтобы получить устойчивую работу при рекуперации электрической энергии, необходимо пересоединить тяговые машины таким образом, чтобы они работали в качестве генераторов шунтового или независимого возбуждения.

В этом последнем случае устойчивая рекуперация электрической энергии вполне возможна.

Это можно пояснить при помощи фиг. 382, на которой изображены внешние характеристики генератора независимого возбуждения при разных числах оборотов: $n_3 > n_2 > n_1$.

Проводя на фиг. 382 горизонталь $U = \text{const}$, мы видим, что последняя пересекает характеристики в точках α, β, λ таким образом, что при увеличении скорости возрастает ток и, следовательно, растет тормозящее действие.

Отсюда мы видим, что такая система будет работать вполне **устойчиво**. Поэтому для перехода на рекуперацию тяговые

двигатели последовательного возбуждения должны быть присоединены таким образом, чтобы они могли работать в качестве генераторов шунтового или независимого возбуждения.

§ 177. Классификация рекуперативных схем. Все известные до сих пор системы рекуперации электрической энергии на постоянном токе в зависимости от характера возбуждения могут быть разделены на следующие три класса:

1) возбуждение от специального возбудителя или батареи (так называемое „постороннее возбуждение");

2) возбуждение от тягового двигателя, превращаемого в момент торможения в генератор возбуждения (так называемое „собственное возбуждение");

3) самовозбуждение.

При создании рекуперативных схем представляется несколько вариантов в зависимости от способа включения в схему возбудителя; последний может быть приключен таким образом, что ток возбудителя I_b будет равен:

a) или сумме тока I_a в якоре и тока I_e в обмотке электромагнитов возбуждения: $I_b = I_a + I_e$;

b) или разности этих токов: $I_b = I_a - I_e$;

c) или только току возбуждения: $I_b = I_e$.

§ 178. Соединение № 1 ($I_b = I_a + I_e$). На фиг. 383 показана схема № 1.

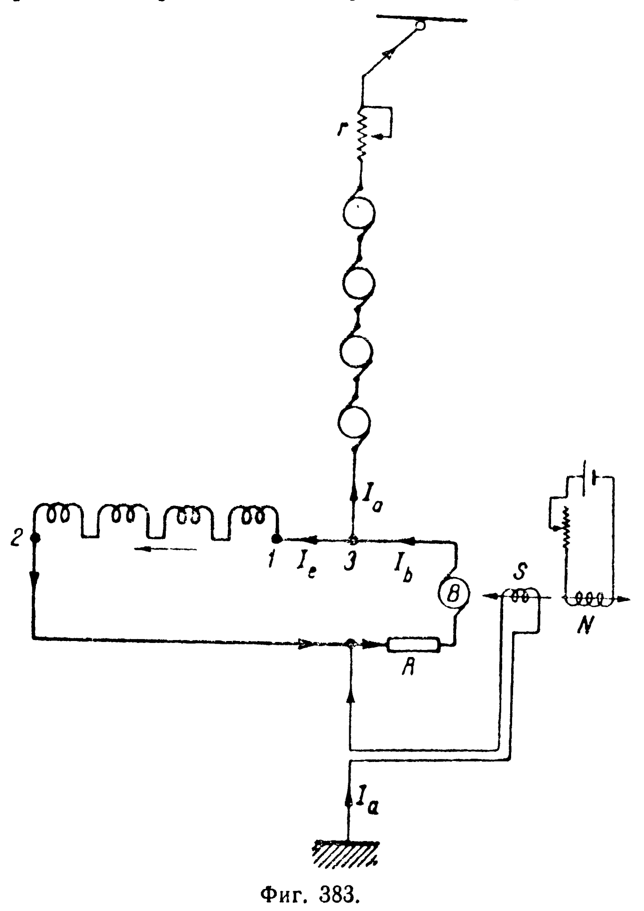
Она применяется на электровозах американской железнодорожной линии (Chicago — Milwankee, GEC), причем число тяговых двигателей, применяемых в этих электровозах, равно шести, а не четырем, как для простоты изображено на фиг. 383 (и на всех других схемах, описываемых здесь).

Ток возбуждения I_b здесь получается от особой вспомогательной машины генератора B, имеющего обмотку N независимого возбуждения. Генератор B имеет, кроме того, еще противокомпаундную обмотку S, питаемую главным током. Возбудитель B обычно приводится во вращение от оси электровоза или небольшим шунтовым двигателем. Противокомпаундная обмотка S возбудителя имеет своим назначением смягчение толчков тока при торможении и при колебании напряжения в троллейном проводе: в момент падения напряжения в сети в первое мгновение возрастает ток I_a в якорях тяговых машин, а следовательно, и в противокомпаундной обмотке возбудителя B, что влечет за собой уменьшение э. д. с. возбудителя и в последующий момент — соответственное уменьшение тока I_a в якорях. Ток возбудителя I_b, как видно из фиг. 383 (см. узловую точку 3), здесь должен быть равен сумме якорного тока I_a и тока I_b в электромагнитах возбуждения: $I_b = I_a + I_e$.

При работе машин в качестве двигателей схема фиг. 383 должна быть переключена. На фиг. 384 показана такая переключенная рабочая схема.

Переход с рекуперативной (фиг. 383) на рабочую схему (фиг. 384) здесь происходит путем выключения возбудителя B простым размыканием рубильника R.

Сравнивая фиг. 383 и 384 между собой, мы видим, что при вышеуказанной манипуляции направление тока в обмотке возбуждения **не изменяется**, но изменяется только направление тока I_a в якорях машин, в результате чего машины из генераторного режима переводятся на режим моторный. [1]



Фиг. 383.

§ 179. **Соединение № 2** ($I_b = I_a - I_e$). Переставив концы *1-2* обмоток возбуждения на фиг. 383 и одновременно с этим изменив направление тока I_e, получим новую схему фиг. 385.

Рассматривая узловую точку *3* этой схемы, мы видим, что здесь ток возбудителя I_b будет равен не сумме, как раньше, но разности токов:

$$I_b = I_a - I_e.$$

Таким образом мы видим, что здесь возбудительная машина *B*

---

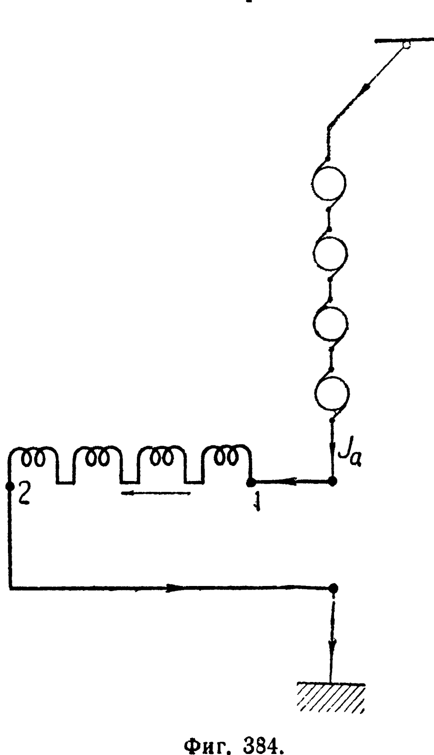
[1] На всех фиг. 383, 384, 385, 386 и т. д. цепь электромагнитов возбуждения для наглядности показана более толстыми линиями.

получается меньшей мощности, чем при схеме фиг. 383; это является достоинством схемы фиг. 385.

Однако схема фиг. 385 обладает также и большим недостатком, который заключается в том, что при переходе на моторную работу приходится производить переключение обмоток возбуждения, как показано на фиг. 386, это влечет за собой некоторое усложнение контроллерной схемы.

Второй недостаток заключается в том, что реверсирование магнитного потока возбуждения сопровождается толчком тока в сети.

§ 180. Соединение № 3 ($I_b = I_e$). Расположив якорь возбудителя B согласно фиг. 387 и включив в цепь обмоток возбуждения противокомпаундную обмотку S возбудителя таким образом, чтобы по обмотке S протекала сумма токов $I_a + I_e$, получим новую схему (фиг. 387).



Фиг. 384.

Как видно, возбудитель B при этой схеме обтекается только током возбуждения I_e, что позволяет взять машину B меньшего веса.

Сравнивая фиг. 387 с фиг. 383, мы должны отдать предпочтение схеме фиг. 387, при которой получается более легкий возбудитель B[1] и которая допускает такой же простой переход с генераторной на моторную работу, как и схема фиг. 383.

§ 181. Соединение № 4 ($I_b = I_e$). В схеме фиг. 387 смягчение толчков тока достигалось при помощи противокомпаундной обмотки S возбудителя.

Такого же результата можно добиться и без противокомпаундной обмотки, применяя вместо нее стабилизирующее сопротивление R, как показано на фиг. 388.

Как видно из этой фигуры, сопротивление здесь обтекается суммой токов $I_a + I_e$.

Значение стабилизирующего сопротивления R в схеме фиг. 388 в смысле уменьшения толчков тока при рекуперации весьма велико.

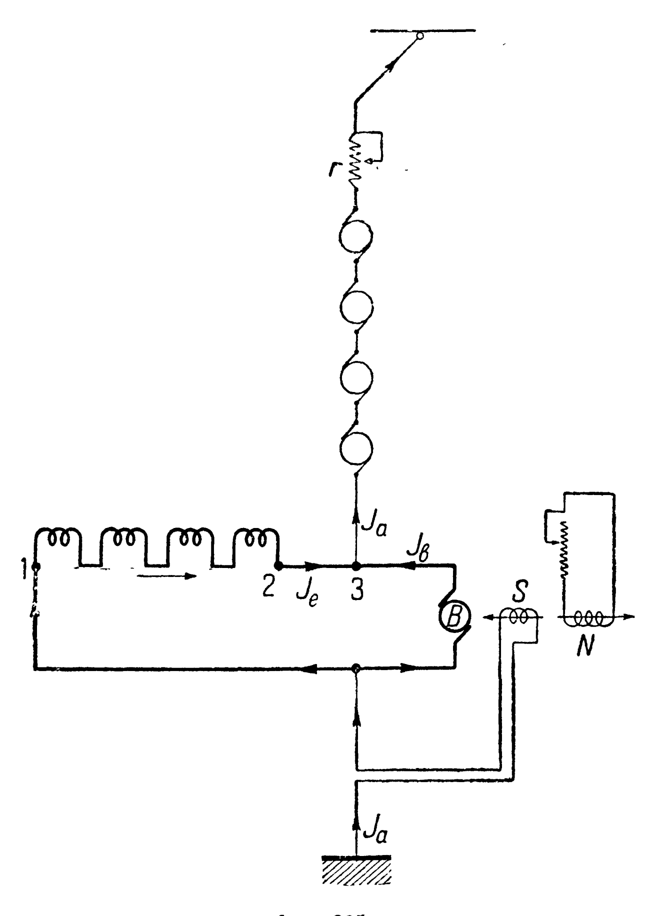
---

[1] Так как возбудитель B обтекается не суммой токов $I_a + I_e$, как на фиг. 383, а только током I_b.

Роль этого сопротивления R можно уяснить себе из следующих соображений:

Предположим, что тяговые машины работают на сеть в качестве генераторов, и предположим, что в какой-нибудь момент времени произошло резкое уменьшение напряжения U в троллейном проводе.

В результате такого уменьшения U ток регенерации I_a в пер-



Фиг. 385.

вый момент резко возрастает, что вызовет немедленно соответственное увеличение падения напряжения в стабилизирующем сопротивлении $(I_e + I_a) R$.

Последнее обстоятельство послужит причиной соответственного уменьшения тока возбуждения I_b, в результате чего э. д. с., индуктированные в якорях тяговых машин, уменьшатся и ток рекуперации I_a также уменьшится.

Для пояснения вышесказанного и уяснения себе явления с количественной стороны напишем для замкнутой цепи, образован-

ной из катушек возбуждения R_e, якоря возбудителя B и сопротивления R, следующее уравнение Кирхгофа:

$$e = (I_a + I_e) R + I_e \left(\sum R_e \right),$$

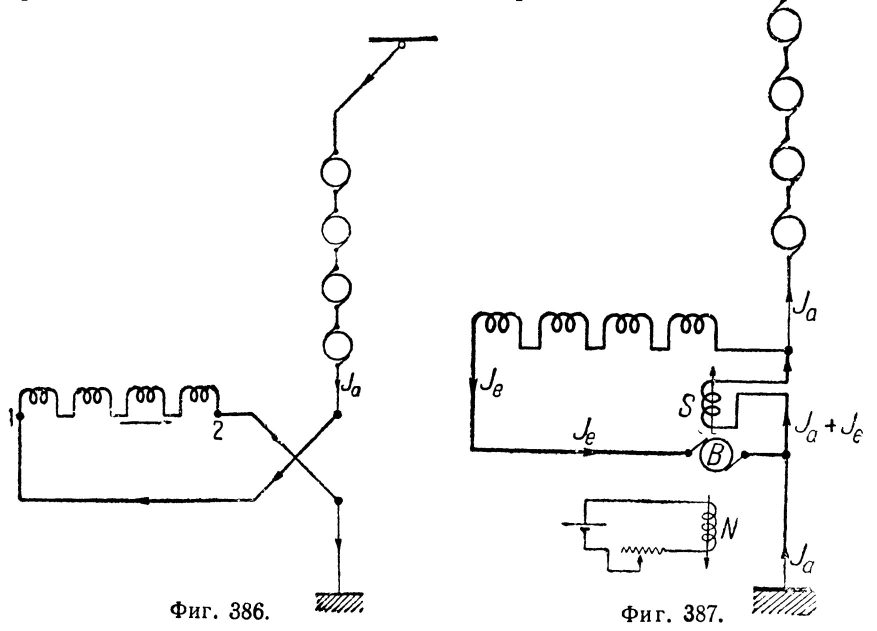
где e—э. д. с. возбудителя, $\sum R_e$ — сумма всех сопротивлений обмоток возбуждения.

Из последнего уравнения найдем

$$I_e \doteq \frac{e - I_a R}{R + \sum R_e}.$$

Это уравнение показывает, что при возрастании тока рекуперации I_a числитель этого выражения уменьшается и, следовательно, сила тока возбуждения I_e в соответствии с этим делается меньше, что влечет за собой уменьшение э. д. с. в якорях тяговых машин и соответственное ограничение тока рекуперации I_a.

Достоинство схемы фиг. 388 по сравнению с фиг. 387 заключается в более быстрой стабилизации вследствие замены катушки S с большой индуктивностью активным сопротивлением R.

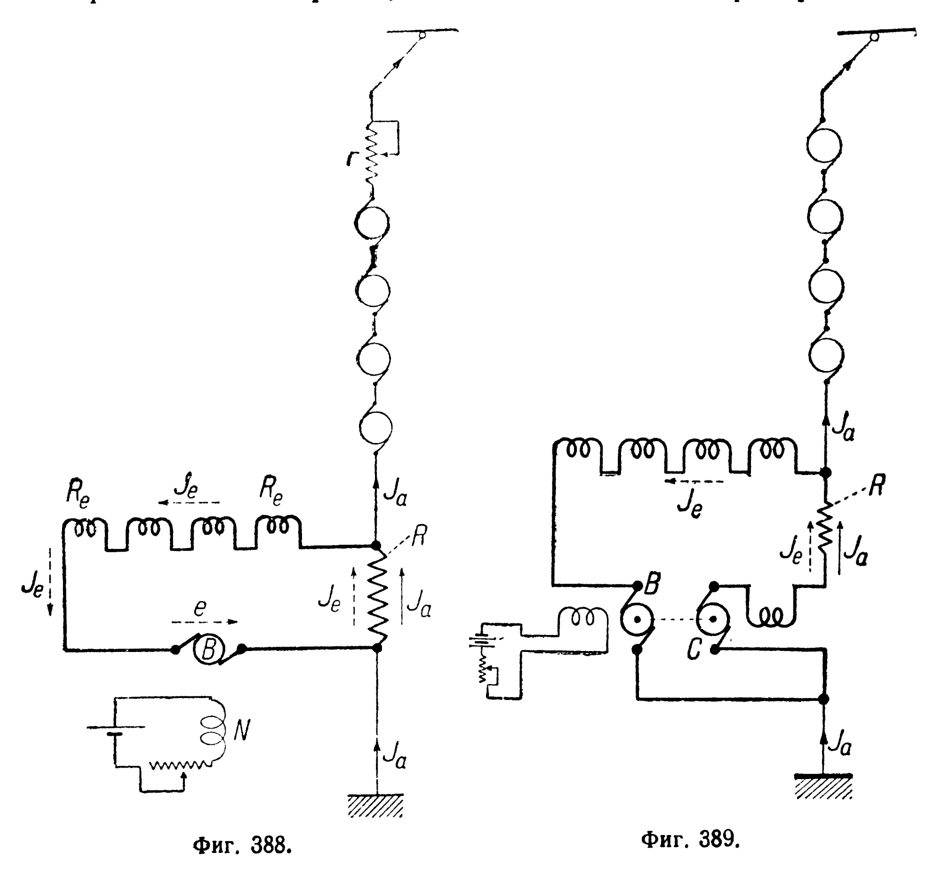


Фиг. 386. Фиг. 387.

Недостатком является некоторое понижение к. п. д., обусловленное потерями в стабилизирующем сопротивлении.

§ 182. Соединение № 4а. Некоторым недостатком схемы № 4 (фиг. 388) является наличность в главной цепи стабилизирующего сопротивления *R*, понижающего к. п. д. установки при рекуперативной работе.

Обычно величина этого стабилизирующего сопротивления *R* выбирается таким образом, чтобы оно составляло примерно 1,25



Фиг. 388. Фиг. 389.

от сопротивления всех обмоток возбуждения, включенных в цепь возбудителя.

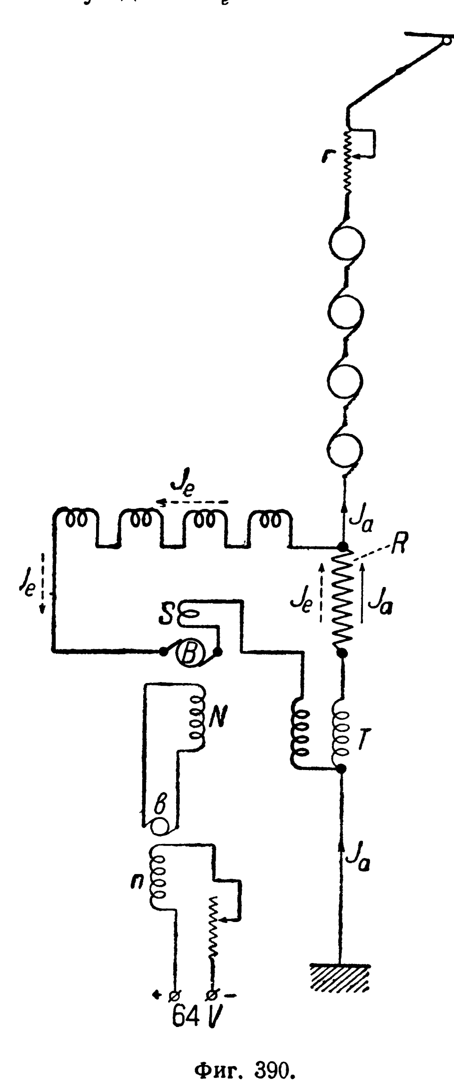
Эту схему можно усовершенствовать путем замены части активного сопротивления *R* небольшой динамомашиной последовательного возбуждения *C*, сидящей на одном валу с возбудителем *B* (фиг. 389).

Достоинство этой схемы заключается в уменьшении джоулевых потерь в сопротивлении *R*, которое теперь получается значительно меньше по сравнению со схемой № 4.

Второе достоинство этой схемы (фиг. 389) по сравнению с вышеупомянутой (фиг. 388) явствует из следующих рассуждений:

При рекуперативном торможении неизбежными являются резкие толчки тока.

При таких быстрых изменениях тока ток в электромагнитах возбуждения I_e почти не меняется благодаря большой самоиндукции электромагнитов, и все изменения тока I_a происходят, главным образом, в стабилизирующем сопротивлении R, приключенном шунтом к обмоткам возбуждения; таким образом, например, при быстром возрастании тока в якоре I_a ток возбуждения I_b и магнитный поток машин вследствие большей самоиндукции катушек возбуждения не успевают достаточно быстро уменьшиться, что влечет за собой в этот момент большие толчки тока.



Фиг. 390.

Эти толчки были бы несколько смягчены в том случае, если бы так называемые „постоянные времени“, характеризуемые отношением активного сопротивления к индуктивному $\frac{r}{L}$ для обеих ветвей (обмоток возбуждения и сопротивления R), не очень бы разнились друг от друга. Для этой цели полезным является приключение добавочной самоиндукции в цепь сопротивления R.

Таким добавочным индуктивным сопротивлением в схеме фиг. 389 является сериесная машина C.[1]

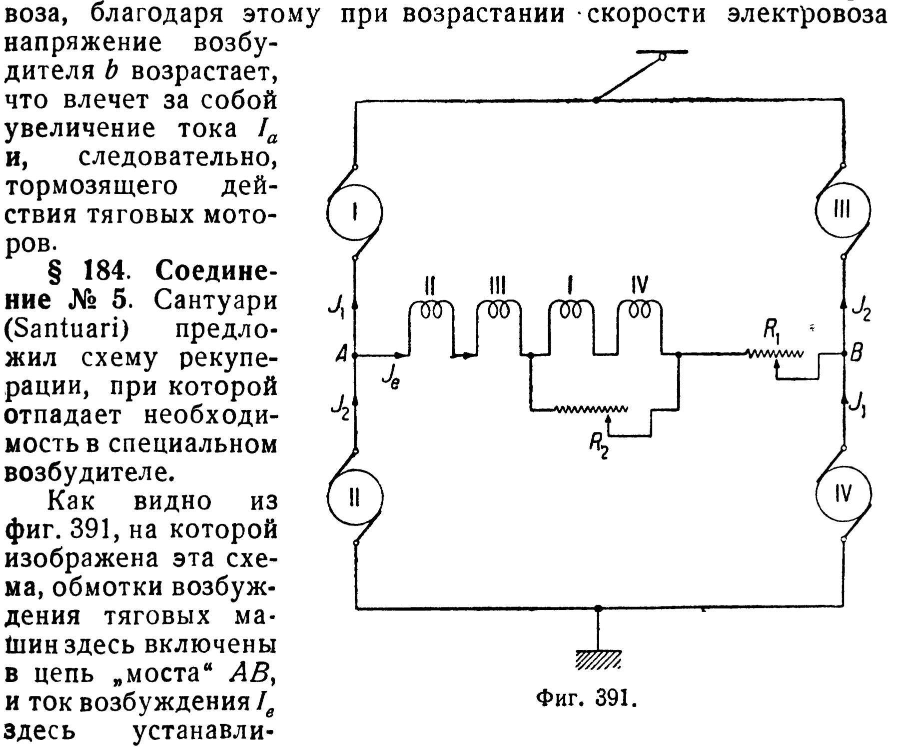
При этих условиях даже при резких колебаниях нагрузки тока I_a в точке 3 будет разветвляться одинаковым образом, т. е. отношение токов $\frac{I_b}{I_a + I_e}$ здесь при всяких нестационарных режимах будет оставаться более или менее постоянным.

§ 183. Соединение № 4b. На фиг. 390 показана рекуперативная схема, которая применена на электровозах железной дороги

---

[1] См. Brown-Boveri Mitt., Juli 1929.

Париж — Лион (Société Alsacienne). Особенностью этой схемы по сравнению со схемой фиг. 388 является наличность трансформатора T, благодаря которому при толчкообразной нагрузке отношение токов $\frac{I_e}{I_a + I_e}$ остается приблизительно постоянным. Обмотка возбуждения N машины B здесь питается от небольшого возбудителя b. Обмотка возбуждения возбудителя n питается от небольшой аккумуляторной батареи на 64 V. Изменяя ток в обмотке n, мы можем регулировать силу тормозного тока I_a. Якорь возбудителя b приводится во вращение от оси электровоза, благодаря этому при возрастании скорости электровоза напряжение возбудителя b возрастает, что влечет за собой увеличение тока I_a и, следовательно, тормозящего действия тяговых моторов.



Фиг. 391.

§ 184. Соединение № 5. Сантуари (Santuari) предложил схему рекуперации, при которой отпадает необходимость в специальном возбудителе.

Как видно из фиг. 391, на которой изображена эта схема, обмотки возбуждения тяговых машин здесь включены в цепь „моста" AB, и ток возбуждения I_e здесь устанавливается разностью токов отдельных ветвей замкнутого контура, образованного четырьмя якорями машины: I, II, III, IV.

Действительно, обращаясь к точке разветвления A, мы можем написать согласно первому закону Кирхгофа

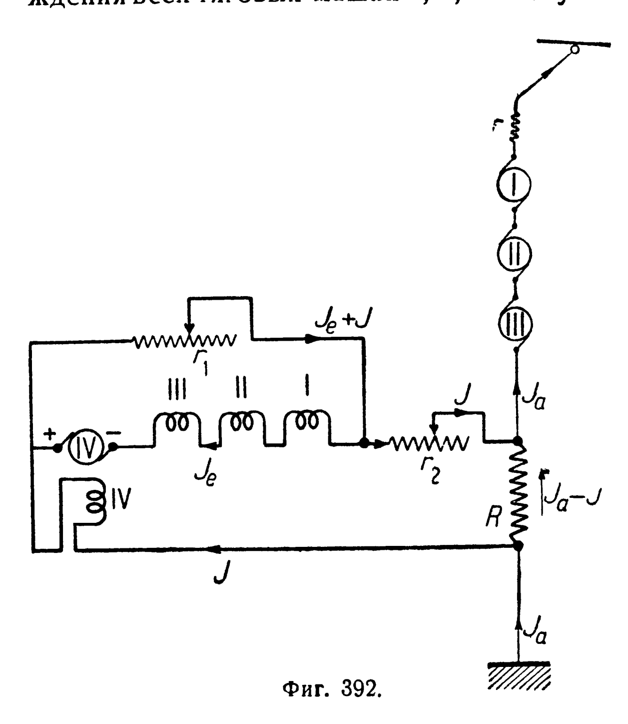
$$I_e = I_2 - I_1.$$

Степень неравномерности токов нагрузок I_1 и I_2, от величины которой зависит ток возбуждения I_e, регулируется здесь путем изменения сопротивления R_2 (для увеличения тормозного действия здесь приходится уменьшать величину сопротивления R_2, что влечет за собой уменьшение э. д. с. якорей I-IV (при неизменной величине э. д. с. якорей II-III).

Недостатком этой схемы является неодинаковая нагрузка якорей *I*, *II*, *III*, *IV* при рекуперации. [1]

§ 185. Соединение № 6. Схема фиг. 392 отличается от фиг. 388 тем, что здесь в качестве возбудителя применен один из тяговых двигателей электровоза. Эта схема применяется в электровозах GEC (General Electric Co) для железных дорог „Paulista Ry" в Ю. Америке.

Рассматривая фиг. 392, мы видим, что здесь обмотки возбуждения всех тяговых машин *I*, *II*, *III* получают питание от одной из тяговых машин, *IV*, которая в момент торможения временно превращается в возбудитель. [2]



Фиг. 392.

Усиление тормозящего действия здесь осуществляется путем постепенного уменьшения сопротивлений r_1 и r_2.

Действительно, рассматривая фиг. 392, мы видим, что уменьшение сопротивления r_2 влечет за собой, главным образом, увеличение тока *I*, текущего в обмотке возбуждения *IV* возбудителя, и в результате — увеличение напряжения последнего, а следовательно, и увеличение тока возбуждения I_e. Уменьшение сопротивления r_1 также служит причиной возрастания тока возбуждения I_e, создаваемого возбудителем *IV*.

Таким образом мы видим, что уменьшение сопротивлений r_1 и r_2 влечет за собой усиление тока рекуперации I_a. Сопротивление *r* на фиг. 392 включается в первый момент времени при переходе на рекуперативную работу.

Необходимость в этом сопротивлении явствует из следующих рассуждений.

В момент, предшествовавший процессу рекуперации, при па-

---

[1] На фиг. 392 обмотки возбуждения, относящиеся к якорям машин *I*, *II*, *III*, *IV*, обозначены такими же цифрами.

[2] На электровозах Paulista Ry установлено не четыре (как показано для простоты на фиг. 392), а шесть тяговых двигателей.

раллельном соединении двух групп двигателей (по два двигателя последовательно в каждой группе), напряжение, приходящееся на каждый двигатель, будет равно $\frac{U}{2}$.

После присоединения машин на торможение (причем происходит переключение машин с параллельного соединения на последовательное) в первый момент времени суммарное напряжение всех машин оказалось бы равным

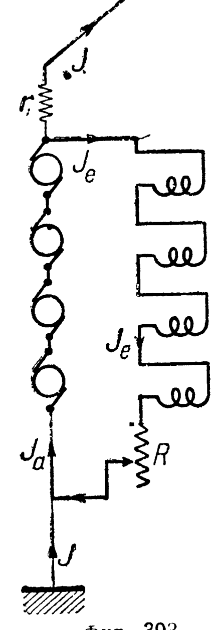
$$\frac{U}{2} \cdot 3 = 1{,}5\ U.$$

Для того чтобы не получить при этом переключении большого толчка тока, необходимо включить последовательно сопротивление r, задача которого будет заключаться в поглощении остатка напряжения, равного в данном случае

$$1{,}5\ U - U = 0{,}5\ U.$$

По мере усиления торможения это сопротивление r может быть затем закорочено. Это сопротивление включается обычно и при всех других схемах рекуперации.

§ 186. Соединение № 7 (самовозбуждение). Возможно такое соединение тяговых машин при рекуперации, при котором все тяговые машины могут быть нагружены равномерно и при котором в то же время можно обойтись без возбудителя системы (AEG). Для этого необходимо все обмотки возбуждения в рекуперативной схеме приключить посредством сопротивления R параллельно к якорям тяговых машин, как показано на фиг. 393; в результате такого пересоединения все тяговые двигатели здесь превращаются в генераторы шунтового возбуждения.



Фиг. 393.

При этих условиях устойчивая рекуперативная работа здесь вполне обеспечена.

Эта система также вполне устойчива по отношению к колебаниям напряжения в троллейном проводе.

Действительно, при колебании напряжения в сети U в сторону уменьшения в первый момент времени увеличивается ток рекуперации I_a, однако в тот же момент времени произойдет соответственное уменьшение тока возбуждения I_e, что повлечет за собой уменьшение величины I_a, и соответственное ослабление торможения.

Сопротивление R, показанное на фиг. 393, играет двоякую роль; оно служит для регулирования тока возбуждения I_e, кроме того, способствует выравниванию временных констант цепей электромагнитов и якорей; о значении этого выравнивания было сказано выше при описании схемы.

§ 187. Сравнение всех систем. Сравнивая веса аппаратуры вышеописанных систем торможения, необходимо отдать предпочтение схемам фиг. 392 и 393, при которых не требуется особых возбудительных машин.

Наименьший вес и стоимость получаются при схеме фиг. 393. Эта схема позволяет производить торможение поездов почти вплоть до остановки, позволяя вести реостатное торможение в случае отсутствия напряжения на троллейном проводе.



Весьма удобной и устойчивой в отношении торможения оказывается также схема фиг. 388.

§ 188. Двигатели смешанного возбуждения для тяги. Все вопросы электрического торможения и рекуперации решаются значительно проще, если отказаться от традиционного двигателя последовательного возбуждения для тяги и в качестве тягового двигателя применить двигатель смешанного возбуждения.

Хотя мысль о целесообразности применения для тяги двигателя-компаунд высказывалась уже давно (Blondel, 1897 г.), но только в 1930 г. впервые были поставлены широкие опыты на парижском метрополитене, подтвердившие соображения о целесообразности применения для тяги двигателей смешанного возбуждения (Baquerisse, 1930 г.).

Опыты ВЭИ, произведенные на московском трамвае, показали ряд преимуществ двигателей смешанного возбуждения, допускающих рекуперативное торможение в широких пределах без усложнения схемы.

Фиг. 394.

На фиг. 394 показана схема соединения двух компаундных двигателей для целей тяги. На этой фигуре означают:

I, *II* — якори двух тяговых машин;

S_1, S_2 — обмотки возбуждения последовательного возбуждения;

N_1, N_2 — обмотки шунтового возбуждения.

При разомкнутых рубильниках *K* и *L* машины работают в качестве двигателей последовательного возбуждения.

При переходе на рекуперативное торможение замыкаются рубильники *K* и *L*, после чего машины начинают работать в ка-

честве генераторов с „противомагнитным“ возбуждением (так как токи I_g и i в обмотках S и N имеют противоположные направления).

Опыты, произведенные с такой системой на берлинском метрополитене, показали экономию в отношении электрической энергии в размере 13—19%.

§ 189. Рекуперация по системе Соманни. Система Соманни позволяет получить рекуперативное торможение почти вплоть до остановки вагона.

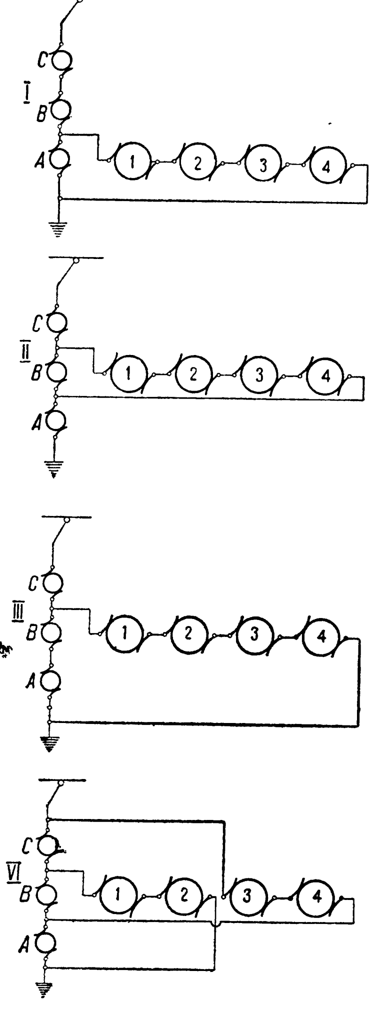
Схема соединений по этой системе показана на фиг. 395.

На этой фигуре означают: *1, 2, 3, 4* — тяговые электродвигатели смешанного возбуждения,

ABC — трехмашинный вспомогательный агрегат, механически совершенно не связанный с ведущими осями и расположенный где-либо отдельно на электровозе.

Трехмашинный агрегат *ABC* все время вращается независимо от того, стоит или движется электровоз.

Число проводов в обмотках якорей *ABC* взято разное, таким образом, что напряжения на коллекторах этих трех машин относятся между собой, как 1 : 2 : 1, что дает возможность при разных комбинациях присоединения тяговых двигателей получить напряжения, равные $^1/_4$, $^2/_4$, $^3/_4$ и $^4/_4$ от сетевого.



Фиг. 395. Схема соединений по системе Соманни.

Сравнивая схемы фиг. 395 между собой, мы видим, что при положении *I* все четыре тяговых электродвигателя *I, II, III, IV* приключены к якорю *A*, на коллекторе которого напряжение равно $^1/_4$ сетевого; приключая тяговые электродвигатели к якорю *B* (положение *II*), мы получаем напряжение $^2/_4$ от нормального, присоединяя тяговые электродвигатели к двум якорям *A* и *B*, мы получаем напряжение $^3/_4$ от нормального (положение *III*), при положении *IV* двигателей разбиваются на две параллельные группы, из которых каждая приключается к напряжению $^3/_4$ от нормального.

ГЛАВА ДВАДЦАТЬ ЧЕТВЕРТАЯ

ПОТЕРИ В ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИНАХ

§ 190. Зависимость между мощностью машины и потерями энергии. В электрических машинах мы имеем дело с превращениями одного вида энергии в другой; при работе электрической машины в качестве генератора происходит превращение механической энергии в электрическую; в двигателях происходит обратное: электрическая энергия, подводимая к двигателю, превращается в механическую.

При всех этих превращениях энергии часть энергии рассеивается бесполезно в окружающее пространство в виде тепла.

Потери в электрических машинах колеблются в очень широких пределах и зависят, главным образом, от мощности машины.

Так, например, двигатель постоянного тока мощностью в 2,0 kW при числе оборотов в минуту $n = 2500$ имеет в среднем суммарные потери $\Sigma p = 22\%$ от полезной мощности двигателя; в двигателе мощностью в 500 kW эти потери уже значительно меньше, опускаясь в среднем до 7%; наконец, в „сверхмощном" двигателе (например, для прокатных станов) мощностью в 10000 kW суммарные потери составляют в среднем всего 3—3,5% от полезной мощности двигателя.

Три рода потерь. Потери, появляющиеся при работе электрической машины, можно разделить на следующие три группы:

1) потери от перемагничивания (гистерезис и токи Фуко);
2) джоулевы потери в якоре и электромагнитах;
3) механические потери (трение в подшипниках, щеток на коллекторе и вихревые потери).

§ 191. Потери на гистерезис в сердечнике якоря. Перемагничивание железного цилиндра, вращающегося в постоянном магнитном поле. Согласно современной теории ферромагнетизма предполагается, что всякое ферромагнитное вещество состоит из множества мельчайших (молекулярных размеров) магнитов. Если внести железный брусок в магнитное поле, все эти молекулярные магнитики повернутся, ориентируясь, в определенную сторону, в зависимости от направления внешнего намагничивающего поля. Если привести железный цилиндр (вроде показанного на фиг. 396) во вращение в магнитном поле *NS*, то при этом будет происходить молекулярное вращение элементарных магнитов, из которых состоит вещество цилиндра.

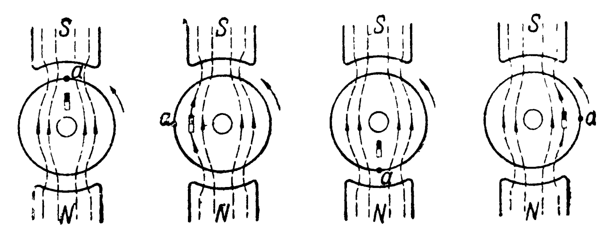
Явления, происходящие в толще железного цилиндра при его вращении в магнитном поле, можно грубо иллюстрировать при помощи фиг. 396.

На этой фигуре изображены контуры якоря в виде железного цилиндра и показан один из вышеуказанных элементарных магнитиков в грубо преувеличенном виде.

Рассматривая положение элементарного магнитика при разных углах поворота якоря, мы видим, что в пространстве магнитик все время сохраняет свое направление неизменным под действием внешнего поля *NS*.

Относительное положение этого магнитика внутри якоря, однако, при вращении последнего все время меняется.

Что это так, можно убедиться, рассматривая положение элементарного магнитика относительно какой-нибудь определенной точки якоря, например, точки *a* (фиг. 396).



Фиг. 396. Перемагничивание при вращении железного цилиндра в магнитном поле *NS*.

Мы видим, что за один поворот якоря вышеуказанный элементарный магнитик относительно точки *a* совершает тоже полный поворот.

Более или менее сходные вращательные движения в толще якоря будут совершать и другие элементарные магнитики, из которых состоит тело якоря. При таком вращении элементарных магнитов появляется известного рода молекулярное трение, что влечет за собой потери и нагрев якоря.

§ 192. Формула для подсчета потерь на гистерезис. Штейнметц нашел эмпирическую формулу, которая позволяет подсчитать потери на гистерезис.

Если перемагничивание железа происходит при предельных значениях магнитной индукции от $+B$ до $-B$, то потери в единицу времени на гистерезис согласно Штейнметцу могут быть найдены из формулы

$$P_h = \eta \cdot f \cdot B^{1,6},$$

где η — некоторая эмпирическая константа, зависящая от сорта железа;

f — число циклов перемагничивания в секунду.

Эта формула была получена Штейнметцем для относительно малых значений магнитной индукции. Для магнитных индукций большего значения, [1] с которыми по большей части приходится иметь дело в современных машинах, эта формула дает чересчур малые значения.

Опыты показывают, что при больших значениях магнитной индукции ($B_{max} > 10\,000$) потери на гистерезис возрастают приблизительно пропорционально квадрату магнитной индукции.

Поэтому проф. Рихтер рекомендует подсчет потерь на гисте-

---

[1] $B \leq 10\,000 - 12\,000$ Gs.

резис вести по другой формуле, в которую магнитная индукция входит во второй степени:

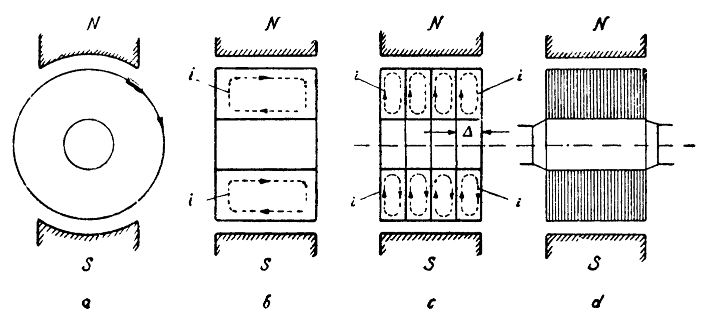
$$P_h = \varepsilon \left(\frac{f}{100}\right)\left(\frac{B}{10\,000}\right)^2 \text{W/kg}. \qquad (192,1)$$

Здесь f — число циклов перемагничивания в секунду:

$$f = \frac{np}{60};$$

B — максимальное значение магнитной индукции;
P_h — потери в ваттах на 1 kg веса железа;
ε — константа, зависящая от сорта железа (см. ниже § 195).

§ 193. Вихревые токи, появляющиеся в железе якоря при его вращении. При вращении якоря в магнитном поле в толще его железа наводятся токи, не производящие полезной работы и вызывающие нагрев якоря.



Фиг. 397. Токи Фуко i, появляющиеся в толще железного цилиндра при его вращении в поле NS.

Эти паразитные токи, носящие название токов Фуко или вихревых токов, представляют собой нежелательное явление и должны быть по возможности сведены до минимума.

Уменьшения величины этих токов Фуко можно добиться, выполняя якорь из железных листов, изолированных друг от друга.

Влияние такой конструкции якоря на величину вихревых потерь иллюстрирует фиг. 397.

На фиг. 397, *a* и *b* показан массивный якорь, вращающийся в постоянном магнитном поле NS; путь токов Фуко i показан на фиг. 397, *b* стрелками.

Разрезая железо якоря плоскостями, перпендикулярными к оси, и изолируя получившиеся таким образом диски друг от друга, мы увеличиваем сопротивление пути вихревых токов, как это схематически показано на фиг. 397, *c*.

Уменьшая толщину Δ железных листов (фиг. 397, *d*), мы можем в еще более сильной степени понизить потери на вихревые токи; обычно в современных машинах толщина железных листов, из которых набирается якорь, бывает Δ = 0,5—0,35 mm.

§ 194. **Формулы для подсчета потерь на токи Фуко.** Потери на токи Фуко, приходящиеся на 1 dm³ железа, можно подсчитать по следующей формуле, представляющей собой некоторое видоизменение формулы, предложенной в свое время Флемингом:

$$P_f = \sigma_f \left(\Delta \frac{f}{100} \cdot \frac{B}{1000}\right)^2 \text{ W/dm}^3, \qquad (194,1)$$

где σ_f — некоторая константа, зависящая от сорта железа;
f — число периодов;
Δ — толщина железных листов в mm;
B — максимальная магнитная индукция.

Соединяя в одну постоянную коэфициент σ_f и толщину листов Δ и относя потери P_f к 1 kg железа, перепишем вышеозначенную формулу в следующем виде:

$$P_f = \sigma \left(\frac{f}{100} \cdot \frac{B}{10\,000}\right)^2 \text{ W/kg}. \qquad (194,2)$$

Эта формула отличается от приведенной выше формулы (192,1) для подсчета потерь на гистерезис тем, что в формуле (194,2) частота f входит в квадрате, в то время как в формуле (192,1) f входит в первой степени.

§ 195. **Формула для подсчета суммарных потерь в железе.** Соединяя формулы (192,1) и (194,2) в одну, найдем выражение для подсчета суммарных потерь на гистерезис и вихревые токи, которые выделяются в течение 1 сек. в 1 kg листового железа:

$$P = P_h + P_f = \left[\varepsilon \frac{f}{100} + \sigma\left(\frac{f}{100}\right)^2\right]\left(\frac{B}{10\,000}\right)^2 \text{ W/kg}. \qquad (195,1)$$

Константы ε и σ, входящие в это выражение, могут быть взяты из следующей таблицы, данные которой получены на основании опытов.

Сорт железа	Толщина Δ в mm	ε (гистерезис)	σ (токи Фуко)	P_0 W/kg
Динамное железо . .	1,0	4,4	22,4	7,8
	0,5	4,4	5,6	3,6
	0,35	4,7	3,2	3,2
Легированное железо[1]	0,5	3,0	1,2	1,8
	0,35	2,4	0,6	1,4

[1] Легированное, или кремнистое, железо отличается от обычного „динамного“ железа относительно большим содержанием кремния (Si), доходящим до 4%. Благодаря присадке кремния удельное омическое сопротивление мягкого железа возрастает в значительной степени (оно примерно в четыре раза больше сопротивления обычного железа); последнее способствует понижению потерь на токи Фуко.

При больших насыщениях (выше 8 000 Gs) магнитное сопротивление легированного железа бывает обычно больше, чем для обыкновенного железа.

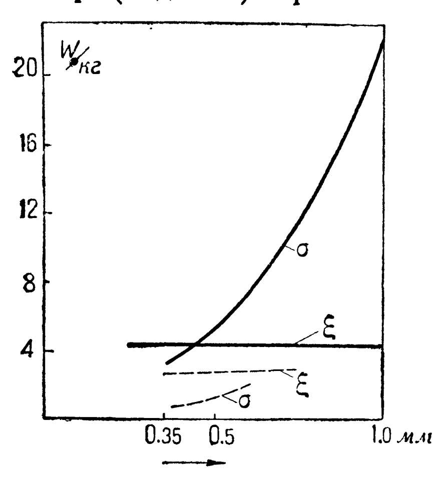
Поэтому легированное железо относительно редко применяется для машин и чаще всего для трансформаторов, в которых магнитные насыщения относительно невелики.

На этой таблице в рубрике P_0 даны „цифры потерь", которые согласно нашим электротехническим „Нормам" должны характеризовать магнитные свойства железа.

P_0 представляет собой число ватт потерь на перемагничение 50 Hz, отнесенное к 1 kg веса железа при магнитной индукции 10000.

Цифра потерь P_0 обычно определяется на специальном аппарате, носящем название аппарата Эпштейна.

§ 196. Потери на гистерезис и вихревые токи в сердечнике якоря (индекс *a*). Применяя вышеприведенные формулы (192,1)—(194,1), найдем суммарные потери на гистерезис P_{ha} и на вихревые токи P_{fa} в сердечнике якоря:



Фиг. 398. Константы для подсчета потер на гистерезис ε и токи Фуко σ в функции толщины железных листов. Сплошные кривые относятся к обыкновенному так называемому „динамному" железу, а пунктирные — к „легированному".

$$P_a = P_{ha} + P_{fa}, \qquad (196,1)$$

$$P_a = k(p_{ha} + p_{fa})G_a,$$

где k — некоторый поправочный коэфициент; [1]

p_{ha} и p_{fa} — потери на гистерезис и вихревые токи, отнесенные к 1 kg железа сердечника;

G_a — вес сердечника якоря в kg (за вычетом веса зубцов).

Принимая удельный вес железа якоря $S = 7{,}8$ g/cm и предполагая, что в среднем около 10% от всей длины железа якоря l бывает занято бумажными изоляционными прослойками между листами, из которых набран якорь, найдем вес железа якоря без зубцов (согласно фиг. 399).

$$G_a = \left[\pi\left(\frac{D}{2} - h_z\right)^2 - \pi\frac{d^2}{4}\right] 0{,}9 \cdot l \cdot 7{,}8 \cdot 10^{-3} \text{ kg}.$$

$$G_a = 22 \cdot l\left[\left(\frac{D}{2} - h_z\right)^2 - \left(\frac{d}{2}\right)^2\right] 10^{-3} \text{ kg}. \qquad (196,2)$$

Величину выражения в скобках уравнения (194,1) найдем на основании формулы (195,1):

$$P_a = P_{ha} + P_{fa} = \left[\varepsilon\frac{f}{100} + \sigma\left(\frac{f}{100}\right)^2\right]\left(\frac{B_a}{10\,000}\right)^2 \text{W/kg}, \qquad (196,3)$$

где B_a — среднее значение магнитной индукции в сердечнике якоря.

Значения коэфициентов ε и σ в последней формуле можно взять согласно приведенной в § 195 таблице.

---

[1] О значении коэфицента k будет сказано ниже.

§ 197. Потери на гистерезис и вихревые токи в зубцах якоря (индекс z). Подсчет потерь в зубцах осложняется тем обстоятельством, что магнитная индукция меняется вдоль высоты зубца, достигая наибольшего значения у основания и наименьшего значения у воздушного зазора.

Имея, однако, в виду большую приближенность расчета потерь вообще, мы можем упростить задачу и при определении потерь в зубцах в расчет вводить только среднюю величину действительной магнитной индукции в зубце B_z.

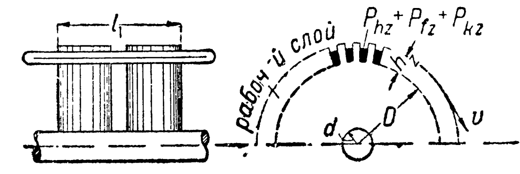
Суммарные потери в зубцах на гистерезис P_{hz} и на вихревые токи P_{fz} найдем по формуле

$$P_z = P_{hz} + P_{fz} = k\,(p_{hz} + p_{fz})\,G_z, \qquad (197,1)$$

где k — некоторый поправочный коэфициент, о значении которого будет сказано ниже;

p_{hz} и p_{fz} — потери на гистерезис и вихревые токи, отнесенные к 1 kg железа зубцов;

G_z — вес всех зубцов в kg;



Фиг. 399. Якорь машины постоянного тока.

Согласно фиг. 399 вес зубцов найдем

$$G_z = 7 \cdot h_z \cdot l\,[(D - h_z)\,\pi - Z \cdot b]\,10^{-3}\ \text{kg}. \qquad (197,2)$$

В этой формуле означают: h_z — высота зубцов в cm; Z — число всех зубцов; b — ширина паза в cm.

Величину выражения в скобках уравнения (197,1) найдем на основании данных (195,2)

$$p_z = p_{hz} + p_{fz} = \left[\varepsilon\,\frac{f}{100} + \sigma\left(\frac{f}{100}\right)^2\right]\left(\frac{B_z}{10\,000}\right)^2 \text{W/kg}, \qquad (197,3)$$

где B_z — среднее значение действительной магнитной индукции в зубцах.

Значения коэфициентов ε и σ даны в таблице § 195.

§ 198. Влияние механической обработки на потери в железе. Обычно потери железа при работе машины получаются больше, чем те, которые определяются лабораторным способом на аппарате Эпштейна.

Главную причину такого расхождения следует приписать механической обработке, которой подвергается обычно железо якоря на заводе.

После штамповки железных листов, из которых набирается якорь, железо делается несколько тверже, в результате чего потери на гистерезис повышаются. Кроме того, после сборки всего железа якоря для устранения всех острых углов и заусениц, которые могли бы повредить обмотку, на заводе происходит обычно опиловка внутренней поверхности пазов при помощи напильника.

Благодаря этому частично уничтожается бумажная изоляция между листами у поверхности якоря и появляется, таким образом, на поверхности якоря непрерывной тонкий проводящий слой, по которому могут беспрепятственно распространяться токи Фуко, повышая потери машины.

§ 199. Тепловые потери в обмотке возбуждения. Эти потери могут быть найдены из уравнения

$$P_n = i_n^2 R_n,$$

где i_n — ток в обмотке возбуждения,

R_n — сопротивление обмотки возбуждения.

Зная число витков w_n обмотки возбуждения, среднюю длину одного витка l_n, катушки возбуждения и сечение q_n провода в mm², можем найти сопротивление

$$R_n = \frac{w_n l_n (1 + 0{,}004\, T_n)}{5\,700 q_n},$$

где T_n — превышение температуры обмотки над окружающей средой (t окружающая 20°).

Таким образом потери энергии на джоулево тепло будут

$$P_n = \frac{i_n^2 w_n l_n (1 + 0{,}004\, T_n)}{5\,700\, q_n}. \qquad (199,1)$$

Полагая $\frac{i_n}{q_n} = S_n$ (плотность тока в A/mm²) и $i_n w_n = AW_n$ (число ампервитков возбуждения), перепишем последнее выражение в следующем виде:

$$P_n = \frac{AW_n l_n S_n}{5\,700} (1 + 0{,}004\, T_n). \qquad (199,2)$$

§ 200. Тепловые потери в обмотке якоря („потери меди“). Ток, проходя по обмотке якоря, нагревает ее. Потери, вызываемые током I_a, проходящим по обмотке якоря, могут быть найдены, если известно сопротивление обмотки якоря R_a.

Сопротивление одной ветви обмотки якоря r_a может быть найдено из формулы

$$r_a = \frac{N}{2a} \cdot \frac{l_a}{100} \cdot \frac{\rho}{q_a},$$

где N — общее число проводов обмотки якоря;

$2a$ — число параллельных ветвей;

l_a — средняя длина полувитка одной секции (фиг. 400);

q_a — сечение провода в mm²;

ρ — удельное сопротивление меди (при температуре 20° $\rho = \frac{1}{57}$).

Сопротивление всей обмотки якоря, состоящей из $2a$ параллельных ветвей, будет

$$R_a = \frac{r_a}{2a} = \frac{N}{(2a)^2} \cdot \frac{l_a}{100} \cdot \frac{\rho}{q_a}.$$

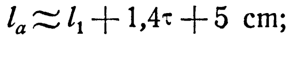
При температуре, превышающей окружающую температуру в 20° на $T_a°$, сопротивление обмотки якоря в омах будет

$$R_a = \frac{N}{2a^2} \cdot \frac{l_a(1 + 0{,}004\,T_a)}{5\,700\,q_a}. \qquad (200{,}1)$$

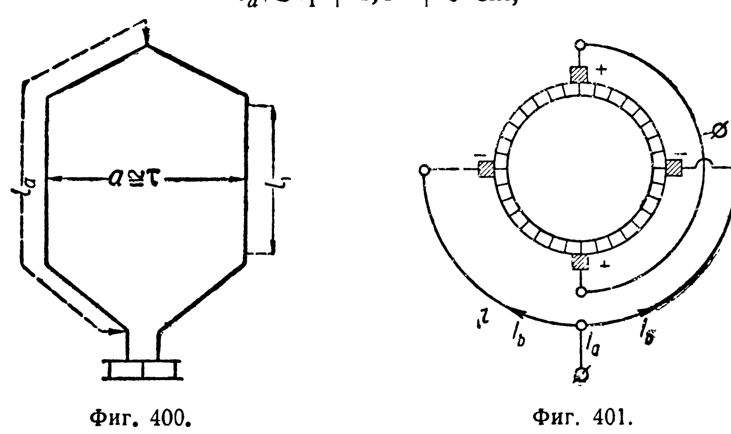
Таким образом потери на джоулево тепло в обмотке якоря будут

$$P_k = I_a^2 R_a \text{ ватт.}$$

Средняя длина полувитка одной секции l_a может быть найдена точно по чертежу (фиг. 400) машины или может быть принята для многополюсных машин приближенно равной



$$l_a \approx l_1 + 1{,}4\tau + 5 \text{ cm};$$



Фиг. 400. Фиг. 401.

в случае двухполюсной машины можно принять

$$l_a \approx l_1 + 1{,}25\,D,$$

где D — диаметр якоря в cm.

§ 201. Тепловые потери в щеточном контакте на коллекторе. Согласно фиг. 401, где изображен схематически коллектор многополюсной машины, ток I_a, притекающий к коллектору, затем разветвляется на несколько частей в зависимости от числа щеточных болтов (фиг. 401).

Ток I_b, притекающий к группе щеток, сидящих на общем болте, будет

$$I_b = \frac{I_a}{p},$$ [1]

где p — число пар полюсов машины.

Ток I_b, текущий от щеток к коллектору (или обратно), создает падение потенциала в щетках ΔU; поэтому потери, приходящиеся на один щеточный палец, будут

$$I_b \cdot \Delta U.$$

[1] Для случая, когда число щеточных болтов равно числу полюсов.

Если число всех щеточных пальцев равно $2p$, то суммарные потери на коллекторе будут

$$P_k = 2p(I_b \cdot \Delta U) = 2I_a \cdot \Delta U \text{ ватт.} \quad (201,1)$$

Чтобы выяснить величину потерь в контакте щеток P_k, нужно знать величину падения напряжения ΔU.

Эта величина зависит от целого ряда факторов: плотности тока в щетках, материала щеток, давления щеток на коллектор, состояния коллектора, температуры и пр.

В настоящее время приходится иметь дело с пятью сортами щеток, это:

1) угольные щетки;
2) графито-угольные;
3) графитные;
4) электрографитированные;
5) металло-графитированные.

1. Угольные щетки изготовляются из аморфного угля, ретортного угля и сажи. Эти материалы, будучи мелко перемолоты и перемешаны, затем запрессовываются в виде стержней и прокаливаются в газовой печи. Эти щетки отличаются большой твердостью и плотностью.

Сопротивление контакта при этих твердых щетках относительно большое. Эти твердые щетки применяются в высоковольтных машинах с напряжением $\gtrsim 500$ V.

2. Графито-угольные щетки получаются из смеси аморфного угля с графитом. Эти щетки обладают твердостью угольных и в то же время хорошо пришлифовываются к коллектору.

3. Графитные щетки обладают малой механической прочностью, что является недостатком, ограничивающим область применения таких сортов щеток. Графитные щетки получаются из графита, измельченного в мелкий порошок и спрессованного в бруски под очень большим давлением.

4. Электрографитированные щетки. Этот сорт щеток получается из аморфного угля со связующими веществами, будучи подвергнут в безвоздушном пространстве действию высокой температуры, вследствие прокаливания током аморфный уголь в этих щетках частично превращается в графит. Таким образом графит в этих щетках получается в результате процесса превращения аморфного угля.

Недостатком графитных щеток, как было сказано выше, является их малая механическая прочность.

Поэтому эти щетки в настоящее время всюду вытесняются электрографитированными.

Среди последних различаются сорта твердые (с малым содержанием графита) и мягкие (с большим содержанием графита). Как те, так и другие хорошо смазывают коллектор, что дает спокойную работу щеток и создает условия хорошей коммутации. Эти щетки находят себе применение в машинах постоянного тока любого напряжения, эти щетки рекомендуется применять в особенности в тех машинах, которые бывают подвержены

частым „толчкам тока“ (например, тяговые и крановые двигатели).

Электрографитированные угли приобрели в настоящее время весьма важное значение в качестве материала для щеток. Это доказывается тем фактом, что электрографитированные щетки применяются также и в коллекторных двигателях переменного тока, где условия коммутации особенно тяжелы.

Положительными свойствами электрографитированных щеток является их большая механическая прочность и малый износ коллектора.

Поэтому эти щетки все больше и больше вытесняют все другие сорта щеток.

5. Металло-угольные щетки. Эти щетки изготовляются из угля и меди, иногда с прибавкой еще другого металла (например, олова). Область применения металло-угольных щеток довольно узкая — это машины низкого напряжения (например, для электролитических целей).

При легких условиях коммутации можно допускать щетки с малым контактным сопротивлением (например, мягкие щетки графитные или электрографитированные).

При тяжелых условиях коммутации рекомендуется брать щетки с большим контактным сопротивлением, т. е. твердые угли или электрографитированные угли средней твердости.

Как было сказано выше, электрографитированные щетки в большинстве случаев тяжелых условий коммутации приводят к хорошим результатам.

Электрографитированные щетки лучше твердых угольных, так как они, с одной стороны, хорошо смазывают коллектор, не подвергая его такому износу, как при твердых щетках, и, с другой стороны, отличаются относительно большим сопротивлением контакта, что благоприятно сказывается на процессе коммутации.

Кроме того, здесь следует отметить, что электрографитированные щетки обладают высокой механической прочностью, поэтому этот сорт щеток является пригодным также для тяжелых условий эксплоатации (например, для тяговых двигателей).

Мягкие щетки „мажут“ коллектор, коллектор при таких щетках требует большого ухода для поддержания его чистым и блестящим. Твердые щетки делают поверхность коллектора блестящей и гладкой. При твердых щетках может быть допущена большая разность потенциалов между краями щетки, чем при мягких щетках.

У нас в СССР применяются сейчас щетки главным образом союзного производства Кудиновского завода „Электроугли“. Сорта щеток у нас стандартизованы (ОСТ, стандарт ВЭТ, утвержденный в 1934 г.).

Ниже приводятся основные положения нашего стандарта.

Из таблиц видно, что по мере увеличения твердости щеток падение напряжения ΔV в щеточном контакте также увеличивается, а допускаемая плотность тока S_b уменьшается.

Определение

Щетки для электрических машин представляют собой скользящий контакт и служат для отвода и подвода тока.

Классификация

Щетки для электрических машин в зависимости от применяемых при их изготовлении материалов, технологического процесса и относительной твердости классифицируются на нижеследующие группы и марки:

Таблица [1]

№ по пор.	Группа	Обозначение группы	Марки 0 Очень высокой твердости	Марки 1 Высокой твердости	Марки 2 Средней твердости	Марки 3 Мягкие	Марки 4 Очень мягкие	Медные	Латунные
I	Угольно-графитовые.	Т	—	Т-1	Т-2	—	—	—	—
II	Графитовые	Г	—	Г-1	Г-2	Г-3	Г-4	—	—
III	Электрографитовые.	ЭГ	—	ЭГ-1	—	ЭГ-3	—	—	—
IV	Графито-медные . .	М	—	М-1	—	М-3	—	—	—
V	Медно-графитовые .	МГ	МГ	МГ-1	МГ-2	МГ-3	—	—	—
VI	Бронзо-графитовые	БГ	—	БГ-1	—	—	—	—	—
VII	Металло-фольговые.	Ф	—	—	—	—	—	МФ	ЛФ
VIII	Металло-сетчатые. .	С	—	—	—	—	—	МС	ЛС

Примечания: 1. Щетки групп ЭГ и БГ временно не стандартизуются.
2. Твердости щеток — в зависимости от марки.

Таблица

Марки по ОСТ	Т-1	Т-2	Г-1	Г-2	Г-3	Г-4	М-1	М-3	МГ	МГ-1	МГ-2	МГ-3
Марки завода „Электроугли“	Т-1	Т-2	А	А-2	В-В2	ВС	М-4	М-1	МГ	МГ-1	МГ-2	МГ-3

Твердые щетки применяются в тех случаях, когда можно ожидать затруднений коммутации (например, в высоковольтных машинах). Твердые щетки, при которых допускаемая плотность тока S_b невелика, требуют соответственно увеличенного числа щеток на щеточном пальце, благодаря чему получается большая длина коллектора.

Мягкие щетки, обладающие меньшим переходным сопротивлением, применяются при невысоких напряжениях на коллекторе (110—120 V).

Применяя мягкие сорта щеток, мы можем допускать большие плотности тока в щеточном контакте, благодаря чему могут быть соответственно уменьшены аксиальные размеры коллектора.

[1] Соответствие марок ОСТ и марок завода „Электроугли“.

Таблица

Механические и электрические свойства щеток

Марка	Обозначение					
	Твердость H	Удельное электрическое сопротивление $\Omega \cdot mm^2/m$	Переходное падение напряжения U	Рекомендуемая плотность тока A/cm^2	Рекомендуемое удельное нажатие g/cm^2	Коэфициент трения f
Т-1	50—70	40—60	Очень высокое	4,5	240—320	Высокий
Т-2	40—55	40—60	Высокое	5,5	240—320	»
Г-1	35—50	30—45	»	6	200—240	»
Г-2	30—45	24—35	»	8	160—240	Средний
Г-3	25—37	10—22	»	10	120—200	»
Г-4	10—18	10—20	Среднее	12	120—160	Низкий
М-1	30—42	2—12	»	14	160—200	Средний
М-3	28—38	6—16	»	12	160—200	»
МГ	6—12	0,05—0,10	Низкое	25	120—150	»
МГ-1	5—7	0,10—0,25	»	22	120—150	Низкий
МГ-2	4—6	0,20—0,40	»	22	120—150	»
МГ-3	3—5	0,30—0,45	»	20	120—150	»

Примечание. В производственных условиях переходное падение напряжения и коэфициент трения меняются для одной и той же марки щеток в зависимости от материала коллектора или кольца, состояния их поверхности, температуры, линейной скорости и т. д. Пределы изменения значения переходного падения напряжения и коэфициента трения следующие:

Переходное падение напряжения		Коэфициент трения	
Низкое	до 0,6 V	Низкий	до 0,25
Среднее	0,6—1,2 »	Средний	0,25—0,40
Высокое	1,2—1,7 »	Высокий	0,40 и выше
Очень высокое . .	1,7 V и выше		

Таблица

Марка щетки . . .		Т-1	Т-2	Г-1	Г-2	Г-3	Г-4	М-3	М-1	МГ	МГ-1	МГ-2	МГ-3
Нажатие на щетку в g/cm^2		320	320	240	200	160	140	180	180	150	150	150	150
Окружная скорость кольца в m/sec .		10	10	10	20	20	30	20	20	20	20	20	20
Плотность тока в A/cm^2	Минимум	2	2	3	4	5	6	6	10	15	15	15	15
	Максимум	7	7	8	10	12	15	18	25	35	30	30	28
	Среднее.	5	5	6	8	10	12	12	18	25	22	22	20

§ 202. Вихревые потери в полюсных башмаках, проводах якоря и неизолированных болтах; меры для уменьшения этих потерь. Кроме рассмотренных выше в машине постоянного тока мы еще имеем дело с рядом потерь, с трудом поддающихся расчету.

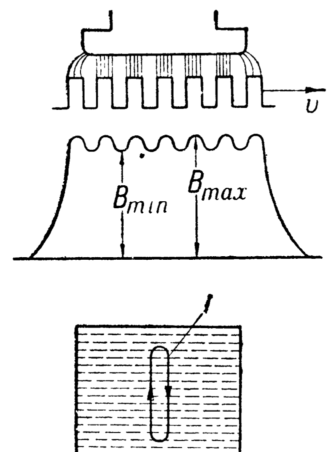
Это:

1) потери на токи Фуко в полюсных башмаках;

2) потери на токи Фуко в меди;

3) потери в неизолированных болтах якоря.

1. Вихревые потери в полюсных башмаках. Часто можно наблюдать явление, при котором у машины, работавшей непрерывно долгое время, полюсные наконечники греются более соседних железных частей полюсов. Причина такого перегрева полюсных башмаков может быть объяснена колебаниями магнитной индукции в воздушном зазоре B_l при вращении машины.



Фиг. 402. Токи Фуко i, наводимые в полюсном башмаке вследствие колебания величины магнитной индукции в воздушном промежутке (в пределах $B_{max} \div B_{min}$).

Как показывает фиг. 402, вследствие наличности зубцов якоря кривая индукция B_l под полюсом имеет волнообразную форму; при вращении якоря эти волны кривой B_l перемещаются под полюсным наконечником со скоростью v, равной окружной скорости якоря; при этом в каждой точке полюсного наконечника магнитная индукция периодически меняется от B_{min} до B_{max}.

Такое изменение индукции в толще полюсного башмака вызывает токи Фуко (фиг. 402) с частотой $f_z = \frac{zn}{60}$, где z — число зубцов якоря и n — число оборотов якоря в минуту. f_z зависит от быстроходности машины и величины зубцового шага t_z; f_z может достигать нескольких тысяч периодов в секунду.

Для того чтобы уменьшить эти паразитные токи Фуко, обычно полюсные башмаки (иногда также и сердечники) набирают из железных листов толщиной в 1 — 2 mm, как показано пунктиром на фиг. 402. В настоящее время почти все современные машины имеют полюса такой конструкции.

Токи Фуко обычно распространяются внутрь сердечника лишь на сравнительно малую глубину, так как неравномерность магнитного потока в полюсных башмаках наблюдается обычно лишь на расстоянии от поверхности башмака $h \approx 3 - 5$ mm.

Есть еще другое средство для уменьшения потерь на токи Фуко в башмаках — это увеличение воздушного зазора δ; влияние зубцов якоря при больших δ на форму кривой магнитной

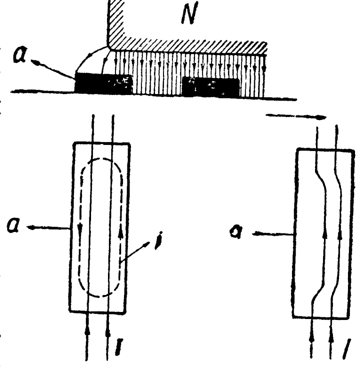
индукции в воздушном зазоре B_l делается меньше, и форма кривой B_l приближается к таковой для гладкого якоря.

2. Потери на токи Фуко в медных проводах якоря. На фиг. 403 показана часть гладкого якоря с обмоткой из плоских проводников *a*. Из чертежа видно, что вблизи края полюса магнитная индукция распределена неравномерно.

Поэтому в правых волокнах какого-нибудь проводника *a*, перемещающегося в данный момент времени у края полюса, будет наводиться большая э. д. с., чем в его левых волокнах.

В результате при работе машины вхолостую в проводе *a* появится ток *i*, замыкающийся внутри провода, как показано на фиг. 403.

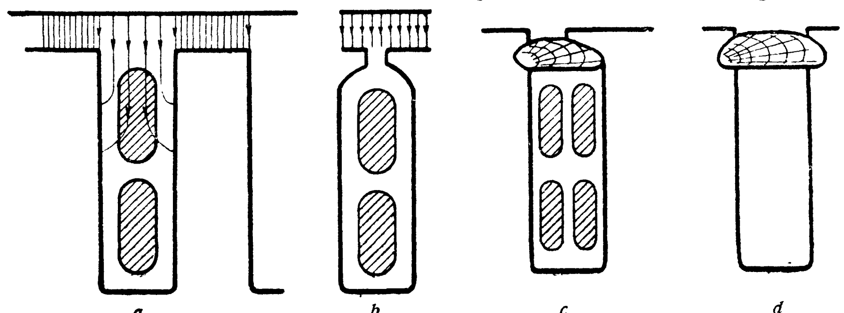
В случае нагруженной машины этот ток *i*, накладываясь на полезный ток *I*, вызывает неравномерное распределение тока по сечению, как это схематически показано на фиг. 403 справа.



Фиг. 403. Наведение токов Фуко *i* в массивных проводах якоря.

Такое неравномерное распределение плотности тока в сечении вызывает соответствующее увеличение джоулевых потерь в обмотке якоря.

3. Средства для уменьшения величины вихревых токов в проводах якоря. Для уменьшения токов Фуко внутри медных проводов якоря представляются два средства.



Фиг. 404. Пазы якоря различной формы.

Можно вместо сплошного проводника применить медные кабели, состоящие из большого числа перевитых проволок малого диаметра, или можно вместо гладкого якоря применить зубчатый якорь, в пазы которого уложена обмотка.

Последнее средство (зубчатые якори) исключительно и применяется на практике.

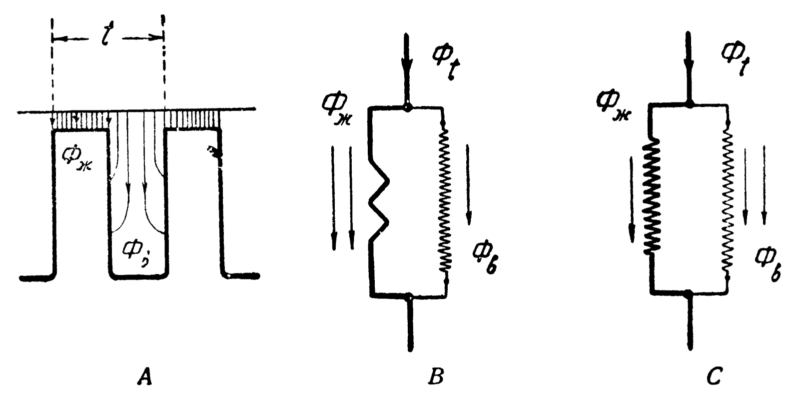
На фиг. 404 показаны пазы различной формы, применяемые в электрических машинах. Как видно из фиг. 404, *a*, в случае открытого паза часть силовых линий заходит внутрь паза.

Полузакрытый паз (фиг. 404, *b*) лучше защищает проводники от проникновения внутрь паза силовых линий. Однако паз такой формы в машинах постоянного тока применяется чрезвычайно редко, так как не допускает возможности применения шаблонной обмотки.

Полузакрытый паз другой формы, изображенный на фиг. 404, *c*, допускает, как будет видно ниже, применение шаблонной обмотки и в то же самое время хорошо защищает внутренность паза от проникновения туда силовых линий поля главных полюсов.

В машинах постоянного тока чаще всего применяют открытые (фиг. 404, *a*) пазы или (в редких случаях) пазы полузакрытого типа (фиг. 404, *c*).

§ 203. Влияние магнитного насыщения зубцов на величину потока, заходящего из главных полюсов в паз. Зубец и рядом расположенный паз, как было указано выше, в магнитном отношении соединены параллельно друг с другом (фиг. 405, *A*).



Фиг. 405. Поток в зубце $\Phi_{ж}$ и в канале Φ_b. *B* — электрическая схема замещения при малом насыщении зубца; *C* — электрическая схема замещения при большом насыщении зубца.

Поток, приходящийся на одно зубцовое деление Φ_t, по выходе из полюса делится на две части: одна часть этого потока проходит через зубец $\Phi_{ж}$ и другая часть этого потока — Φ_b — через рядом лежащий паз. На фиг. 405, *B* изображена электрическая схема, иллюстрирующая распределение потока Φ_b и $\Phi_{ж}$.

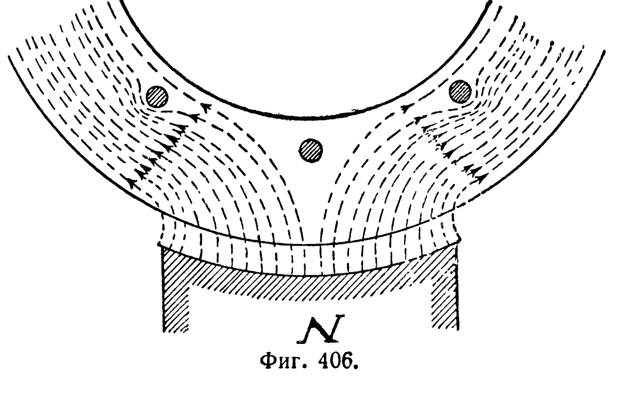
При увеличении магнитного насыщения зубца его магнитное сопротивление возрастает, и поэтому увеличивается относительная величина потока Φ_b, замыкающегося через паз, как это иллюстрирует фиг. 405, *C*.

Поэтому, желая уменьшить по возможности поток Φ_b, замыкающийся через паз, при проектировании машины мы не должны допускать в зубцах чрезмерно больших магнитных насыщений.

§ 204. Потери на вихревые токи в болтах якоря. При некоторых (неправильных) конструкциях пакеты железа якоря стяги-

ваются болтами при помощи двух нажимных боковых шайб достаточной толщины, как показано на фиг. 406 и 407.

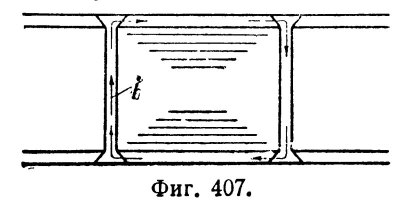
Если болты электрически не изолированы от боковых шайб, то при этом получаются замкнутые витки; в этих витках потечет переменный ток i при вращении якоря благодаря тем э. д. с., которые будут наводиться в стягивающих болтах, пересекаемых силовыми линиями магнитного потока возбуждения (фиг. 407).



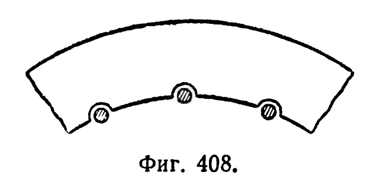
Фиг. 406.

Величина этого тока i может быть сравнительно очень велика ввиду больших сечений стягивающих болтов и шайб.

Этот ток является вредным не только потому, что вызывает потери на джоулево тепло в стягивающих болтах и шайбах, но он также является косвенной причиной повышения потерь на перемагничивание в железе якоря. Это повышение потерь обусловлено увеличением магнитной индукции в железе



Фиг. 407.

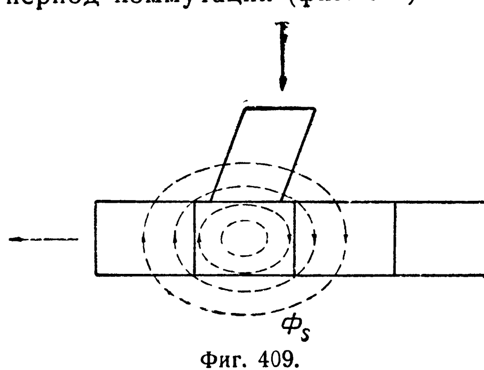

Фиг. 408.

якоря вследствие реакции токов i, текущих в болтах и заставляющих поток замыкаться, минуя стягивающие болты якоря, как показано на фиг. 406. Один способ устранить этот недостаток — это изоляция болтов от тела якоря и от нажимных шайб. Чаще, однако, применяются конструкции, в которых стяжные болты располагаются, как показано на фиг. 408.

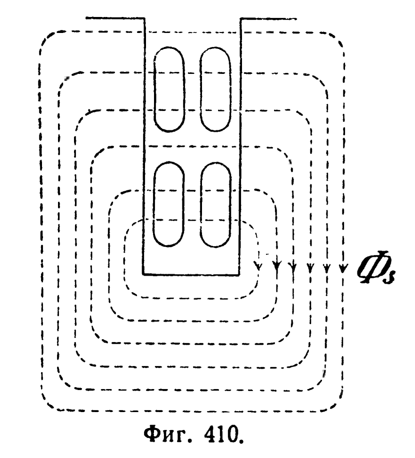
§ 205. Вихревые токи в меди коллектора. Кроме джоулевых потерь в щеточном контакте коллектор нагревается также теми токами Фуко, которые наводятся в толще пластин коллектора.

Причину появления этих токов Фуко можно себе объяснить, рассматривая фиг. 409, где изображены коллектор и щетка, к которой притекает ток I. Этот ток I, протекая по пластинам коллектора, создает вокруг этих пластин круговой магнитный поток Φ_s. Этот поток Φ_s в пространстве расположен неподвижно; пластины коллектора вращаются в этом поле, в результате чего в толще коллекторных пластин появляются токи Фуко, вызывающие дополнительные потери в машине.

§ **206. Вихревые потери в меди якоря, вызванные потоками коммутации.** Зубцовый поток Φ_s, создаваемый в нейтральной зоне пучком проводов, заложенных в паз, меняется с $+\Phi_s$ на $-\Phi_s$ в период коммутации (фиг. 410).



Фиг. 409.



Фиг. 410.

Это изменение потока Φ_s вызывает появление в толще проводов токов Фуко. Эти токи понижают к. п. д. машины.

§ **207. Учет дополнительных потерь.** В предыдущих параграфах кроме потерь на гистерезис и токи Фуко, довольно хорошо поддающихся подсчету, мы рассмотрели еще ряд других потерь, точный подсчет которых затруднителен. К последним относятся: вихревые потери в полюсных башмаках, проводах якорной обмотки и неизолированных болтах. Кроме того, было указано, что следующая после сборки сердечника якоря обработка (опиловка заусениц, шлифовка внешней поверхности и т. п.) вызывает соответственное увеличение потерь на гистерезис и токи Фуко в железе якоря. Вводя в формулы (197,1) и (196,1) для упрощения задачи некоторую среднюю величину магнитной индукции, мы сознательно допустили некоторую ошибку. Расчет потерь железа по средней величине магнитной индукции можно было бы вести только в том случае, если бы эти потери изменялись пропорционально не второй, а первой степени магнитной индукции.

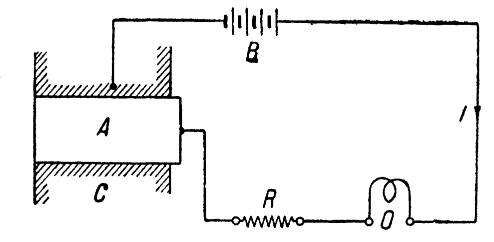
Для того чтобы учесть вышеуказанную ошибку и, кроме того, чтобы учесть грубо приближенно влияние обработки якоря, повышающей потери железа, можно положить в формулах (196,1) и (197,1) поправочный коэфициент $x \approx 2$.

§ **208. Механические потери.** a) Трение в подшипниках. Как показали опыты Штрибека, Лаше (Stribeck, Lasche) и других, при определенной скорости вращения между цапфой и вкладышем подшипника появляется устойчивый слой смазочного масла. Таким образом при вращении цапфы мы имеем дело с трением твердого тела о жидкое.

b) Опыты автора. Можно предполагать, что при работе машины толщина смазочного слоя между цапфой и вкладышем подвержена колебаниям; на эту толщину должны влиять температура, сорт смазочного масла, нагрузка на шейку вала и т. п.

Для экспериментального выяснения этих вопросов автором этой книги был произведен следующий опыт[1] (фиг. 411):

Была образована замкнутая цепь из аккумуляторной батареи B в 10 V, реостата R в 5 Ω, шейки вала A, тела подшипника C, шлейфы осциллографа O и амперметра (не показанного на схеме фиг. 411).



Фиг. 411. Опытная схема для выяснения характера смазки подшипника.

При вращении машины с нормальной скоростью шейка вала A и тело подшипника C изолированы друг от друга тонким слоем смазочного масла, которое увлекается вращающейся шейкой вала. При малых скоростях такого устойчивого слоя масла не образуется, и шейка вала при этих условиях начинает соприкасаться непосредственно с рабочей поверхностью вкладыша подшипника.

Сказанное иллюстрируют кривые тока I (фиг. 412), полученные из опыта с одной машиной небольшой мощности (15 *л. с.*).

Как видно из фиг. 412, для испытуемой машины устойчивый слой масла в подшипнике появлялся только при 250—300 об/мин (нормальное число оборотов в минуту этой машины $n = 800$ об/мин).

Фиг. 412. Кривые тока I в зависимости от числа оборотов в минуту n (опыты автора).

c) Формулы для подсчета потерь на трение в подшипниках. По Гобарту (Hobart) потери в подшипниках можно приближенно находить по формуле

$$P_\rho = l \cdot d \cdot v \cdot 0{,}5 \text{ ватт},$$

где l — длина цапфы в cm; d — диаметр цапфы в cm; v — окружная скорость цапфы в m/sec.

Потери на трение в подшипниках не зависят от нагрузки машины, поэтому в вышеприведенную формулу не входит выражение мощности машины.

В случае роликового или шарикового подшипника можно пользоваться другой эмпирической формулой

$$P_\rho = 0{,}015 \frac{P}{D} v, \qquad (208{,}1)$$

[1] См. Archiv für Elektrotechnik, 1922, т. XI, вып. 3. „Stabilität der Oelschicht bei Lagern“, Claudius Schenfer.

где P — давление на цапфу в kg.

D — диаметр окружности, проведенной через центры роликов, в cm.

d) Трение щеток о коллектор. При определении потерь на трение щеток о коллектор можно пользоваться формулой

$$P_r = 9{,}81 \cdot P_b \cdot F_b \cdot K_r \cdot v_k \text{ ватт.} \qquad (208{,}2)$$

Здесь означают:

P_b — давление щеток на коллектор [1];

K_r — коэфициент трения [2];

F_b — поверхность контакта щеток в cm^2;

v_k — окружная скорость коллектора в m/sec.

Опыт показывает, что величина коэфициента трения K_r, входящая в вышеприведенную формулу, несколько меняется в зависимости от величины окружной скорости v_k, уменьшаясь с возрастанием v_k.

e) Вентиляционные потери. Точный учет потерь трения вращающегося якоря о воздух весьма затруднителен; при приближенных расчетах можно руководиться следующими данными:

По Паршалю и Гобарту (Parschal и Hobart) для машин быстроходного типа (400—60 kW, n=300 — 1 500 об/мин) вентиляционные потери колеблются в пределах 1 — 3% от всей мощности машины. Для машин тихоходного типа от 500 до 50 kW эти потери обычно бывают ниже, колеблясь в пределах 0,8—2%.

Если у машины имеется вентилятор, вентиляционные потери возрастают; эти потери в этом случае можно подсчитать, пользуясь формулой

$$P_L = 9{,}81 \frac{H}{\eta} V \text{ ватт,} \qquad (208{,}4)$$

где η — к. п. д. вентилятора;

V — объем просасываемого вентилятором воздуха в m^3/sec;

H — воздушный напор, создаваемый вентилятором, в mm вод. ст.

Для машин тихоходного типа обычно бывает

$$V < 15 \text{ m/sec и } 30 < H < 50 \text{ mm вод. ст.}$$

Для быстроходных машин в среднем имеем

$$V \approx 90 \text{ m/sec и } 50 < H < 100 \text{ mm вод. ст.}$$

Коэфициент полезного действия вентилятора η при пользовании формулой (208,4) можно принимать в среднем равным 0,5.

Вентиляционные потери можно также подсчитывать приближенно по следующей эмпирической формуле:

$$P_L = 1{,}1 \; Vv^2 \text{ ватт,} \qquad (208{,}5)$$

где V — объем воздуха в m^3, прогоняемый вентилятором в 1 сек., и v — скорость движения воздуха в m/sec.

---

[1] См. табл. на стр. 325.

[2] См. табл. на стр. 325.

Так как объем прогоняемого воздуха в секунду V растет прямо пропорционально скорости v, то на основании (208,5) получаем $P_L \equiv v^3$, т. е. отсюда видно, что для данной машины вентиляционные потери растут прямо пропорционально кубу окружной скорости машины, или, другими словами, прямо пропорционально кубу числа оборотов в минуту.

§ 209. Коэфициент полезного действия. Коэфициент полезного действия машины выражается обычно следующим образом:

$$\eta = \frac{\text{полезно отданная мощность}}{\text{подведенная мощность}} = \frac{P_2}{P_1}.$$

Обозначив через $P_v = P_n + P_k + P_{hf} + P_\rho + P_r + P_L$ суммарные потери в машине, найдем:

	Генератор	Мотор
Подведенная мощность . . $P_1 =$	$UI + P_v$	UI
Отданная мощность . . . $P_2 =$	UI	$UI - P_v$

Таким образом будет:

к. п. д. генератора $\eta_g = \dfrac{UI}{UI + P_v}$; к. п. д. мотора $\eta_m = \dfrac{UI - P_v}{UI}$.

Например, если для какого-нибудь частного случая у нас будет

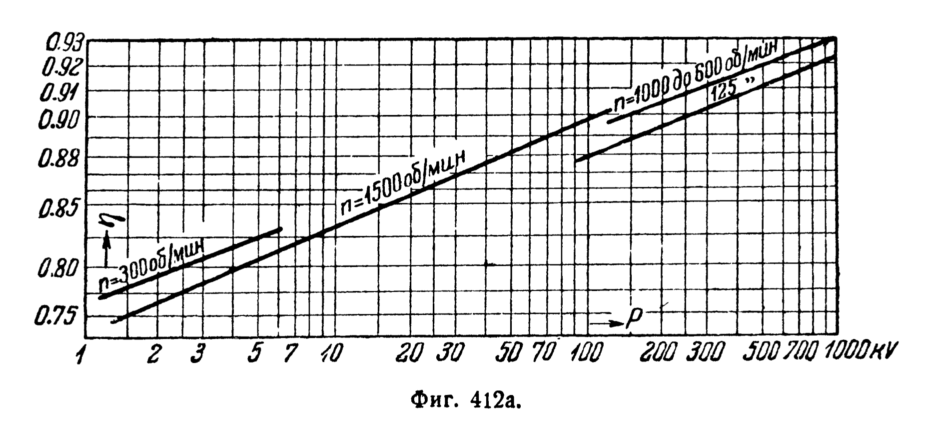
$$VI = 1\,000 \text{ W и } P_v = 200 \text{ W},$$

мы получим

$$\eta_g = \frac{1\,000}{1\,000 + 200} = 0{,}83; \qquad \eta_m = \frac{1\,000 - 200}{1\,000} = 0{,}80.$$

Коэфициент полезного действия машины зависит от ее мощности и быстроходности, с возрастанием последних растет также и к. п. д. машины.

На фиг. 412а приведены кривые, которые дают средние величины к. п. д. η в функции мощности машины[1] P.



Фиг. 412а.

Быстроходные машины имеют, как правило, более высокие значения к. п. д. по сравнению с тихоходными машинами.

---

[1] Лифшиц, т. III, стр. 293.

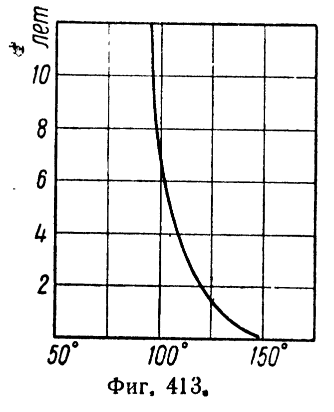
ГЛАВА ДВАДЦАТЬ ПЯТАЯ

НАГРЕВАНИЕ МАШИН

§ 210. Влияние нагревания на продолжительность службы изоляции. Как было сказано выше, превращение энергии в электрической машине сопровождается потерями.

Энергия, потерянная в машине, превращается в тепло и нагревает машину.

Продолжительность службы электрических машин в значительной мере обусловлена состоянием ее изоляции. Влияние нагревания и его продолжительности на стойкость хлопчатобумажной изоляции машин было исследовано Штейнметцем и Ламме (Steinmetz и Lamme).



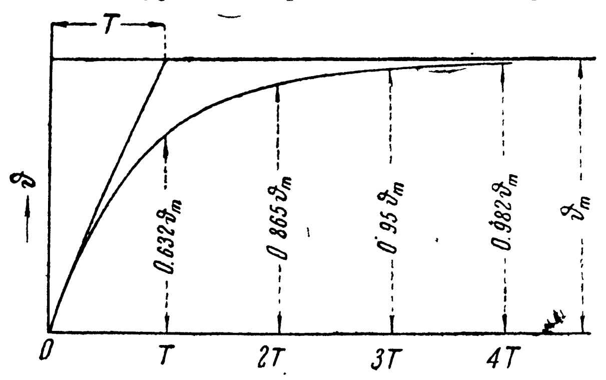
Фиг. 413.

На фиг. 413 приведена кривая, полученная ими на основании многолетних опытов.

На этой кривой по осям абсцисс отложены температуры в градусах Цельсия, до которых была нагрета изоляция, а по осям ординат — продолжительность службы изоляции в годах. Эта кривая показывает, что наибольшей еще безопасной температурой для хлопчатобумажной изоляции является примерно 95°.

При больших температурах изоляция начинает обугливаться, и срок ее службы понижается. Так, например, из фиг. 413 видно, что при $t = 125°$ продолжительность службы изоляции равна всего нескольким месяцам.

§ 211. Изменение температуры нагрева электрической машины в функции времени. Потери, развивающиеся при работе электрической машины, вызывают повышение температуры машины.



Фиг. 414. Распределение температуры внутри нагретой катушки электромагнита.

Если нагревать какое-либо тело путем подведения к нему энергии постоянной мощности, то процесс нагрева изобразится кривой, которая имеет некоторое сходство по внешней форме с кривой намагничения железа (фиг. 414).

Опыт и теория показывают, что кривая нагрева асимптотически стремится к постоянной величине — к постоянной конеч-

ной максимальной температуре перегрева ϑ_{max}, которая получается при установившемся процессе.

Если нагревание начинается с перегрева $\vartheta = 0$, т. е. когда температура помещения и машины одна и та же, то процесс нарастания перегрева машины ϑ над окружающей температурой в функции времени может быть представлен при помощи уравнения

$$\vartheta = \vartheta_{max}(1 - e^{-\frac{t}{T}}), \quad (211,1)$$ [1]

где ϑ — перегрев или разность температур, равная превышению температуры нагретого тела над окружающей температурой;

ϑ_{max} — максимальный перегрев, получающийся при установившемся процессе;

t — время, протекшее от начала процесса;

T — так называемая постоянная времени.

Уравнение (211,1) представляет собой уравнение показательной кривой. Физический смысл постоянной времени T можно уяснить, если в уравнении (211,1) положить $t = T$; в последнем случае получится

$$\vartheta = \vartheta_{max}(1 - e^{-1}),$$

откуда

$$\vartheta = \vartheta_{max}\frac{e-1}{e};$$

$$\vartheta = 0{,}633\,\vartheta_{max}.$$

Таким образом мы видим, что T есть время, в течение которого машина нагревается до температуры, равной 0,633 от установившейся.

При $t = 4T$ найдем $\vartheta = 0{,}98\,\vartheta_{max}$. Можно считать при $t = 4T$ тепловой режим вполне практически установившимся.

Теория показывает, что постоянная времени T может быть выражена следующим образом:

$$T = \frac{G \cdot c}{S \cdot \alpha}, \quad (211,2)$$

где G — вес тела в kg;

c — удельная темплоемкость, т. е. количество тепла в больших калориях, необходимое для нагрева 1 kg данного тела на 1°C;

S — поверхность тела в cm^2;

α — коэфициент рассеяния, т. е. количество тепла в больших калориях, рассеиваемое в 1 сек. 1 cm^2 данной поверхности при превышении температуры последней над температурой окружающей среды на 1° C.

---

[1] См. „Испытания электрических машин постоянного тока“ под ред. проф. Л. М. Пиотровского.

Заметим, что постоянная времени T может быть найдена графически путем проведения касательной к кривой нагрева в точке начала координат, как показано на фиг. 414.

При $t = \infty$ из уравнения (211,1) получаем

$$\vartheta = \vartheta_{max}.$$

Эта величина представляет собой конечное превышение температуры, которое получается в машине после бесконечно долгого времени ее работы.

Практически состояние установившегося нагрева в машине в зависимости от ее мощности наступает в среднем через $t = 4T$, т. е. через 3—5 час. для малых машин, через 5—10—20 час. для средних и больших машин.

Из предыдущего ясно, что температура работающей машины не должна превосходить некоторой нормы во избежание обугливания и порчи изоляции.

Из кривой фиг. 413 мы видели, что при температуре 95° хлопчатобумажная изоляция начинает обугливаться и разрушаться.

§ 212. Классификация изолирующих материалов. Все изолирующие материалы, применяемые в электрических машинах, в отношении допускаемых для них наибольших температур нагрева разделяются на следующие четыре класса:

a) Класс 0. Непропитанные и непогруженные в масло волокнистые материалы, как-то: хлопчатобумажные пряжа и ткань, натуральный шелк, бумага и тому подобные органические вещества.

Примечание. Изолирующие материалы класса 0 в электрических машинах применять не рекомендуется.

b) Класс А. Пропитанные или погруженные в масло волокнистые материалы, как-то: хлопчатобумажные пряжа и ткань, натуральный шелк, бумага и тому подобные органические вещества, а также эмаль, служащие для покрытия проводников.

Примечание. Хлопчатобумажная, бумажная и шелковая изоляция считается „пропитанной“, если пропитывающее вещество вытесняет собой воздух между отдельными волокнами, причем это вещество не обязательно должно заполнять собой промежутки между изолированными проводниками.

Пропитывающее вещество не должно разжижаться под влиянием допустимых предельных температур; оно должно быть теплостойким и должно обладать хорошими изолирующими свойствами.

c) Класс В. Препараты из слюды, асбеста и тому подобных материалов минерального происхождения со связующими веществами.

Примечание. Если совместно с изоляционным материалом класса В с целью крепления применяется в небольшом количестве изоляционный материал класса А, то

подобная комбинированная изоляция может быть отнесена к классу B в том случае, если электрические и механические свойства обмотки с этой изоляцией не ухудшаются из-за действия более высокой температуры, допускаемой для материалов класса B (здесь под словом „ухудшение“ следует понимать, что не будут иметь места никакие изменения, которые могут сделать изоляцию непригодной для длительной работы).

d) Класс C. Слюда без связующих материалов, фарфор, стекло, кварц и другие подобные материалы.

Примечание. Если для изоляции различных частей обмотки (как-то: утопленных во впадинах и лобовых) применены разные материалы, то предельная допустимая температура для каждой из частей обмотки определяется примененной для этой части изоляцией.

Если изоляция, примененная для какой-либо части машины, состоит из чередующихся слоев изолирующих материалов разных классов (например, чередующихся слоев материалов класса A и класса B), то предельно допустимой для такой части температурой является та температура, которая соответствует материалу с наименьшей предельной температурой.

§ 213. Эмпирические формулы для подсчета перегрева машины. Ввиду сказанного в предыдущем параграфе ясно, как важно при проектировании машины иметь возможность хотя бы с грубым приближением заранее подсчитать температуры частей машины с целью убедиться, что они не превзойдут допускаемых норм.

Для подсчета повышения температуры, однако, нет вполне надежных и точных формул; при расчете обычно приходится пользоваться эмпирическими, грубо приближенными формулами, которые, впрочем, для отдельных типов машин довольно хорошо оправдываются на опыте.

§ 214. Нагревание катушек электромагнитов. Катушки возбуждения нагреваются, главным образом, тем джоулевым теплом, которое выделяется в самой обмотке электромагнитов при протекании в них тока возбуждения.

Кроме того, катушки возбуждения нагреваются также теплом полюсных башмаков, выделяющимся в них благодаря токам Фуко, циркулирующим в полюсных башмаках, и наконец, катушки отчасти нагреваются также теплом, излучаемым нагретым якорем.

Как показывает опыт, обычно наиболее сильно нагреваются внутренние слои катушки, охлаждение которых наиболее затруднено.

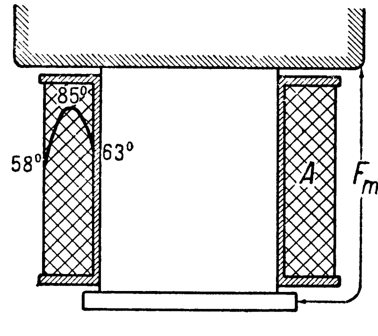
Примерный характер распределения температуры внутри катушки одной работающей машины показан на фиг. 415. Как видно из этой фигуры, наибольшая температура $t_{max} = 85°$ получается в среднем слое катушки и наименьшая $t_{min} = 58°$ — у наружной поверхности.

Наибольшие наблюдаемые температуры и наибольшие превышения температуры частей машины

№ по пор.	Класс изоляции	Наименование частей машины или род обмотки	Наибольшая наблюдаемая температура в °С	Наибольшее превышение температуры в °С	Метод измерения
1	Класс 0	Все обмотки на вращающихся и неподвижных частях машины за исключением указанных ниже в пп. 5, 6 и 7 этой таблицы	80	45	Методы сопротивления с проверкой по методу термометра
2	Класс А	Все обмотки на вращающихся и неподвижных частях машины за исключением указанных ниже в пп. 5, 6 и 7 этой таблицы	95	60	
3	Класс В	Все обмотки на вращающихся и неподвижных частях машины за исключением указанных ниже в пп. 5, 6 и 7 этой таблицы	115	80	
4	Класс С	Все обмотки на вращающихся и неподвижных частях машины за исключением указанных ниже в пп. 5, 6 и 7 этой таблицы	Ограничены таким нагревом, при котором температура средних частей, а также превышение температуры, не превосходит допускаемых для этих частей пределов		
5	Класс 0, А и В	Изолированные, постоянно замкнутые накоротко обмотки. Обмотки, не позволяющие измерять сопротивление без нарушения целости обмотки	На 5° выше, чем указанные в пп. 1, 2 и 3 этой таблицы		Метод термометра
6	Без изоляции	Постоянно замкнутые накоротко обмотки	Как в п. 4 этой таблицы		
7	Все классы	Однорядные обмотки возбуждения с голой неизолированной поверхностью	На 5° выше, чем указанные в пп. 1, 2 и 3 этой таблицы		Как в пп. 1—4 этой таблицы
8	—	Листовая сталь, не соприкасающаяся с обмотками	Как в п. 4 этой таблицы		Метод термометра
9	—	Листовая сталь с уложенными в ней обмотками	Как в пп. 1, 2, 3 и 4 этой таблицы		
10	—	Коллектор и контактные кольца	95	60	
11	—	Подшипники	80	45	
12	—	Все другие части	Как в п. 8 этой таблицы		

На основании опытов известно, что точка наивысшей температуры находится вблизи центра тяжести сечения катушки. Разница между максимальной температурой в середине катушки и температурой на ее внешней поверхности обычно достигает 50—60% и может в исключительных случаях доходить даже до 100%.

Отсюда следует, что способ непосредственного измерения температуры поверхности катушки термометром еще не дает указания относительно величины максимальной температуры катушки.



Фиг. 415.

Поэтому нашими „Нормами" рекомендуется определять повышение температуры обмотки по возрастанию ее сопротивления. Однако необходимо сказать, что и этот способ дает лишь некоторую среднюю температуру, не позволяя определить максимальной температуры внутри катушки. Для нахождения последней при намотке катушки на заводе можно внутри катушки расположить несколько термопар; соединяя последние с гальванометром во время работы машины, мы можем найти действительное распределение температуры внутри катушки.

Из опытов найдено, что повышение температуры катушек электромагнитов T_m пропорционально потерям W_m, нагревающим катушку, и обратно пропорционально поверхности охлаждения F_m, поэтому мы можем написать

$$T_m = C_m \frac{W_m}{F_m} \, ^\circ\mathrm{C},$$

где C_m — некоторая опытная постоянная.

Эту формулу мы можем еще переписать так:

$$T_m = \frac{C_m}{\left(\frac{F_m}{W_m}\right)} .$$

Входящее в знаменатель последнего выражения отношение обозначим

$$\frac{F_m}{W_m} = f_m ,$$

где $f_m = \frac{\text{поверхность охлаждения в cm}^2}{\text{потери в W}}$ будем в дальнейшем называть **удельной поверхностью охлаждения**. Таким образом имеем

$$T_m = \frac{C_m}{f_m} , \tag{214,1}$$

т. е. повышение температуры катушек электромагнитов обратно пропорционально удельной поверхности охлаждения.

Обычно при расчетах за поверхность охлаждения F_m условно принимается только та часть поверхности катушек электромагнитов, через которую беспрепятственно происходит отдача тепла в окружающую атмосферу (фиг. 415).

Опытный коэфициент C_m, входящий в формулу (214,1), можно при расчетах выбирать из следующей таблицы:

Совершенно открытые машины . . .	$C_m = 450—550$
Машины с подшипниковыми щитами	$C_m = 550—650$
Полузакрытые машины	$C_m = 650—750$
Машины закрытого типа	$C_m = 1\,300$ и выше

§ 215. Нагревание якоря. Зубцы якоря и заложенные в пазы проводники образуют собой рабочий слой толщины h_z, расположенный по цилиндрической поверхности якоря (фиг. 399).

В этом рабочем слое якоря выделяется тепло, вызванное потерями на гистерезис и токи Фуко в зубцах $P_{hz}+P_{fz}$, а также тепло, вызванное той частью потерь на джоулево тепло P_{kz} самой обмотки якоря, которая соответствует осевой длине рабочего слоя l_1.

При этом мы несколько условно предполагаем, что потери железа в самом сердечнике якоря нагревают только этот сердечник и не отдают тепла вышеозначенному рабочему слою.

Торцевые части обмотки якоря охлаждаются хорошо (отдавая тепло в окружающий их воздух). Поэтому при расчете нагрева обмотки якоря в пазах, как было отмечено выше, принимаем в расчет только ту часть джоулевых потерь, которая выделяется на длине якоря l_1, т. е.

$$P_{kz} = \frac{l_1}{l_a} P_{ka},$$

где

$$P_{ka} = I_a^2 R_a.$$

Таким образом повышение температуры в рабочем слое якоря вызывается, главным образом, суммой потерь

$$P_{hz} + P_{fz} + P_{kz}.$$

Повышение температуры рабочего слоя можно приближенно подсчитать по следующей эмпирической формуле:

$$T_a = \frac{C_a}{f_a}, \qquad (215,1)$$

где C_a — некоторая опытная постоянная и f_a — удельная поверхность охлаждения якоря.

Последняя величина (т. е. удельная поверхность охлаждения якоря) может быть найдена из следующего выражения:

$$f_a = \frac{\pi D l_1}{P_{hz} + P_{fz} + P_{kz}} (1 + 0{,}1\, v). \tag{215,2}$$

Здесь $\pi D l_1$ — внешняя цилиндрическая поверхность охлаждения якоря и v — окружная скорость якоря в m/sec.

Увеличивая удельную поверхность охлаждения якоря f_a в отношении эмпирического множителя $(1 + 0{,}1\, v)$, мы, таким образом, учитываем улучшение вентиляции якоря, связанное с его вращением.

Коэфициент C_a, входящий в формулу (215,1), можно брать на основании опытных данных следующей таблицы:

Машина полузакрытого типа	$C_a = 45 - 5500$
Машина открытого типа	$C_a = 350 - 450$

§ 216. Нагрев коллектора. Повышение температуры коллектора работающей машины может быть подсчитано на основании следующей эмпирической формулы:

$$T_k = \frac{C_k}{f_k}, \tag{216,1}$$

где f_k — удельная поверхность охлаждения коллектора и C_k — опытный коэфициент.

Удельная поверхность охлаждения может быть найдена из следующего выражения:

$$f_k = \frac{\pi D_k l_k}{P_\rho + P_k} (1 + 0{,}1\, v_k). \tag{216,2}$$

В этой формуле означают:

D_k — диаметр коллектора в cm;

l_k — длина коллектора в cm;

$P_\rho + P_k$ — потери трения и джоулевы потери в контакте щеток на коллекторе;

$(1 + 0{,}1\, v_k)$ — эмпирический множитель, учитывающий улучшение охлаждения вследствие вращения коллектора.

Опытный коэфициент в формуле (216,1) колеблется обычно в следующих пределах:

$$C_k = 100 \div 150.$$

ГЛАВА ДВАДЦАТЬ ШЕСТАЯ

ВЕНТИЛЯЦИЯ

§ 217. Расчет вентиляции машины. Машины современных конструкций, характеризующиеся сильным использованием активного материала, требуют по большей части искусственной вентиляции.

В особенности нуждаются в усиленной вентиляции быстроходные машины, которые вследствие своих компактных размеров имеют небольшую по отношению к мощности охлаждающуюся поверхность.

Поэтому такие машины должны особенно интенсивно вентилироваться.

Для достижения хорошего охлаждения при минимальном количестве вентилирующего воздуха при проектировании вентиляции следует подводить охлаждающий воздух по кратчайшим воздушным путям к местам („очагам") наибольшего выделения тепла.

Количество охлаждающего воздуха, подводимое к машине при помощи вентилятора, должно соответствовать тепловым потерям машины: вся теплота, развивающаяся в машине (за исключением теплоты, выделяющейся в подшипниках), должна быть отведена воздушным потоком вентилирующего воздуха.

Количество воздуха в единицу времени, необходимое для охлаждения машины, может быть подсчитано по формуле:

$$Q = \frac{0{,}9 \cdot P_v}{\Delta t_в}.$$

Здесь

Q — объем охлаждающего воздуха в m^3/sec,

P_v — потери в машине (исключая потери в подшипниках);

$\Delta t_в$ — повышение температуры охлаждающего воздуха в градусах Цельсия.

Обычно при расчетах в среднем принимается $\Delta t_в = 20°C$, что примерно равно $^1/_3$ допустимого для обмоток повышения температуры.

В случае изоляции класса А можно задаваться степенью перегрева охлаждающего воздуха на основании данных нижеследующей таблицы. [1]

Система вентиляции	$\Delta t_в$
Радиальная система	12—16° C
Аксиальная система без каналов в железе	18° C
Аксиальная система с аксиальными каналами в железе	23—26° C

В случае изоляции класса В подогрев воздуха в формуле следует брать на 15% выше.

[1] См. инж. В. А. Трапезников „Электричество" № 22, 1935 г., и сборник „За единые серии электрических машин". вып. II.

Вентиляторы, применяемые для охлаждения электрических машин, бывают двух типов, вентиляторы центробежные и вентиляторы осевые (пропеллерные).

Вентиляторы последнего типа применяются, главным образом, для охлаждения турбогенераторов, а в машинах прочих типов мы имеем дело, главным образом, с вентиляторами центробежными.

Мощность, потребляемую вентилятором, можно подсчитать на основании формулы [1]

$$P_{вент} = 1{,}4\, Q v_в^2,$$

где Q — полезная производительность вентилятора в m³/sec;
$v_в$ — окружная скорость вентиляторов в m/sec.

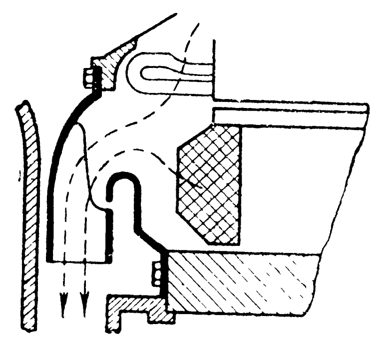
Пример. Предположим, что в моторе мощностью 150 kW потери составляют 10%, т. е. что мы имеем $P_v = 15$ kW. Задаваясь величиной перегрева охлаждающего воздуха $\Delta t_в = 20°$ C, подсчитаем производительность вентилятора:

$$Q = \frac{0{,}9 \cdot 15}{20} = 0{,}675 \text{ m}^3/\text{sec}.$$

Предположим, что окружная скорость на периферии вентилятора равна 30 m/sec.

Найти мощность, потребляемую вентилятором:

$$P_{вент} = 1{,}4 \cdot Q \cdot V_в^2 = 1{,}4 \cdot 0{,}675 \cdot 30^2 = 850 \text{ W}.$$



Фиг. 416

§ 218. Конструкция вентилятора.

Для уменьшения вредных завихрений воздущных струй, создаваемых вентилятором, при проектировании машины следует избегать внезапных изменений сечений воздухопровода и, где это возможно, придавать деталям обтекаемую форму, сглаживая всюду острые углы.

Воздух, выйдя из вентилятора, не должен испытывать резких заворотов и резких изменений скорости.

Хорошая конструкция вентилятора изображена на фиг. 416 и 417, где исключается возможность завихрения и ударов воздушных струй при входе и выходе последних из вентилятора.

Путем надлежащего соблюдения требования аэродинамики и придания охлаждаемым частям машины хорошо обтекаемых форм при проектировании вентилятора часто удается значительно снизить сопротивление воздушных каналов, что приводит к увеличению количества охлаждающего воздуха, прогоняемого в секунду через машину, и часто дает возможность значительно повысить мощность машины в связи с лучшими условиями охлаждения.

На фиг. 417 дан чертеж совершенно закрытого двигателя с внутренней циркуляцией воздуха и наружным обдувом воздуха через радиатор.

[1] См. инж. В. А. Трапезников „Электричество" № 22, 1935 г., и сборник „За единые серии электрических машин", вып. II.

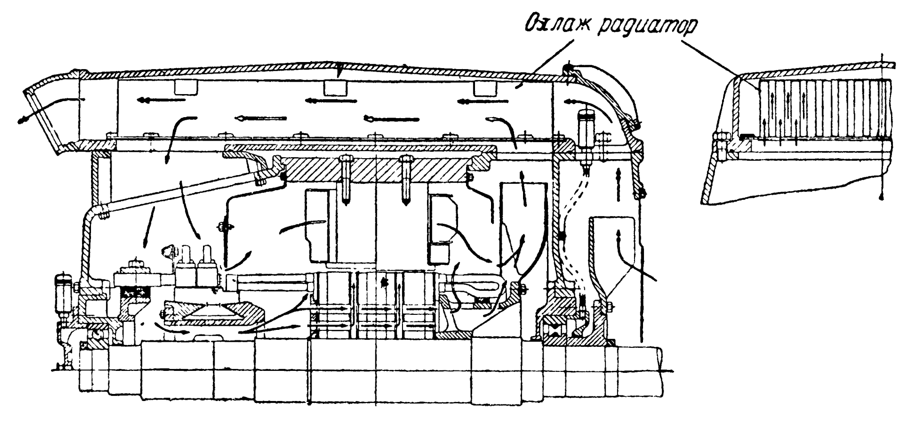
Как видно из фигуры, этот двигатель снабжен двумя вентиляторами (наружного и внутреннего обдува).

Вентилятор, сидящий на валу справа (наружный вентилятор), гонит воздух, забираемый снаружи, по каналам радиатора; путь воздушных струй показан на фиг. 417 стрелками с двойным острием.

Циркуляция воздуха внутри машины осуществляется вторым вентилятором, расположенным внутри машины (слева на фиг. 417 по отношению к вентилятору наружного обдува).

Циркулирующий внутри машины один и тот же объем воздуха отводит тепло от места его возникновения в машине к охлаждающему радиатору.

Как видно из фигуры, внутренная полость машины с наружным воздухом не имеет никакого сообщения, так что на фиг. 417 мы имеем дело с совершенно закрытой машиной. Следует заметить, что мощность совершенно закрытой машины обычно



Фиг. 417.

составляет всего 30—40% от мощности той же машины „в открытом исполнении". Опыты показывают, что мощность совершенно закрытой машины с внешним обдувом составляет 50—60% от мощности открытой машины того же типа.

§ 219. Двигатели закрытого типа. В некоторых установках требуются двигатели совершенно закрытого типа во избежание порчи двигателя от попадающей внутрь двигателя пыли, вредных газов и т. п. В качестве примера здесь можно указать на двигатели для подъемников, для горнозаводского дела, для металлургических заводов и т. п.

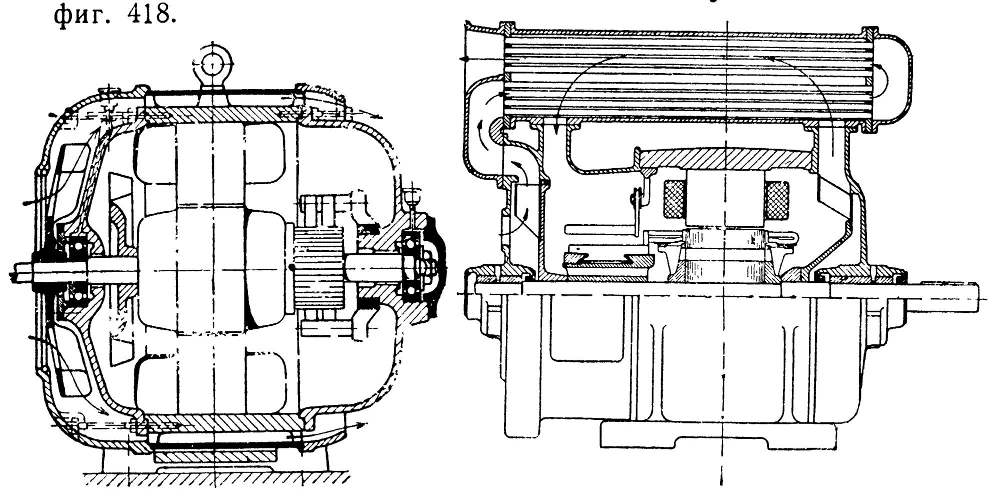
Во всех перечисленных случаях требуется полное ограждение двигателей от окружающего воздуха — их закрытие.

В двигателях закрытого типа, как было сказано выше, отвод тепла в окружающую среду более затруднен, чем в двигателях открытого типа. Поэтому размеры двигателей закрытого типа получаются, как общее правило, большими, чем размеры открытых двигателей на ту же мощность.

В последнее время были сделаны попытки усовершенствовать вентиляцию закрытых двигателей, причем были получены новые конструкции, при которых длительная мощность закрытых типов приближается к мощности машин открытых типов с такими же основными размерами.

Достигнут этот успех был при помощи применения нового способа охлаждения закрытых машин, а именно: интенсивного охлаждения внешней поверхности станины машины.

Идею этого метода охлаждения можно уяснить себе из фиг. 418.



Фиг. 418. Закрытый двигатель с охлаждаемой станиной.

Фиг. 419. Закрытый двигатель с воздушным охладителем.

На этой фигуре изображен двигатель постоянного тока закрытого типа новой конструкции.[1]

Как видно из фигуры, внешняя цилиндрическая поверхность станины этого двигателя окружена оболочкой.

Вентилятор, расположенный на фигуре слева, засасывает из окружающего пространства воздух, прогоняет его в аксиальном направлении и производит, таким образом, охлаждение внешней цилиндрической поверхности станины.

При такой конструкции содержание пыли в охлаждающем воздухе вреда машине принести не может, так как якорь, коллектор и полюса совершенно закрыты.

Мощность машин такого типа достигает в среднем 80—100% мощности открытых двигателей с одинаковыми основными размерами.

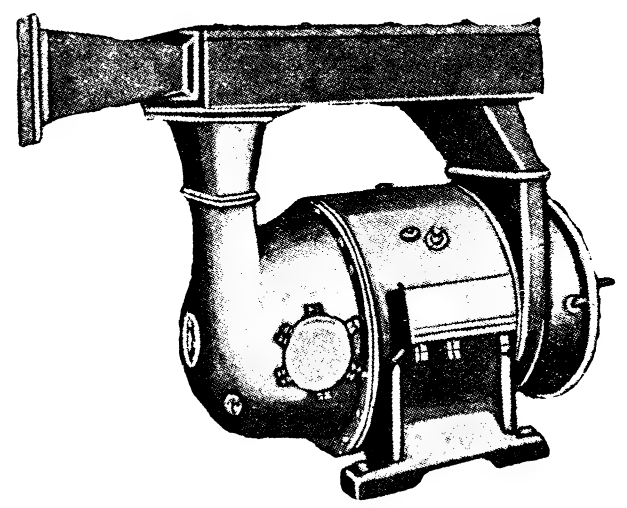
На фиг. 419 показан двигатель с двойным охлаждением несколько другой конструкции.[2] Как видно из фигуры, этот двигатель совершенно закрытого типа и имеет два вентилятора.

Вентилятор, расположенный справа, перемешивает воздух

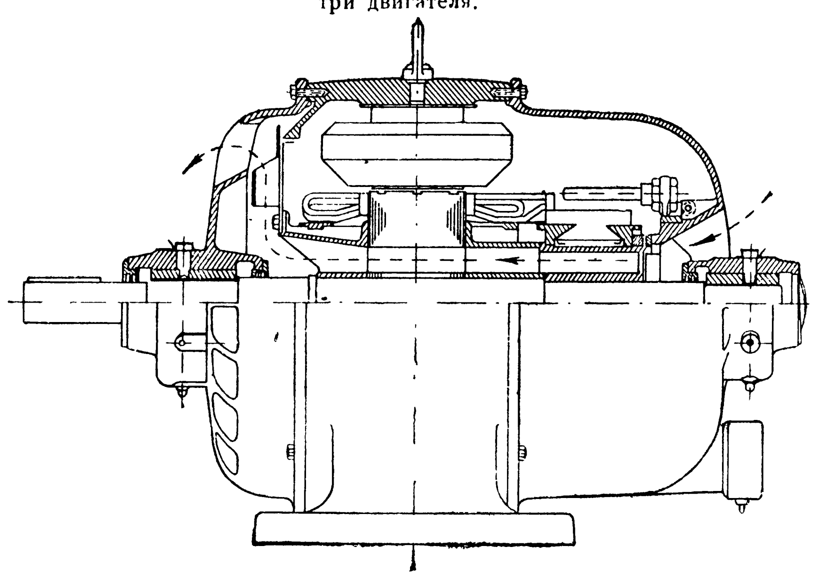
[1] См. Новости науки и техники, вып. 4, 1921

[2] См. „AEG-Mitteilungen“ № 4, 1925.

внутри закрытого пространства двигателя и прогоняет его в трубчатый охладитель, расположенный сверху двигателя.



Фиг. 420. Закрытый двигатель на 50 *л. с.* при 1 800 об/мин с охлаждением воздуха, циркулирующего внутри двигателя.



Фиг. 421. Закрытый двигатель с охлаждением железа якоря (стрелками указан путь охлаждающего воздуха).

Через трубки охладителя в свою очередь прогоняется наружный воздух при помощи другого вентилятора, расположенного слева на чертеже.

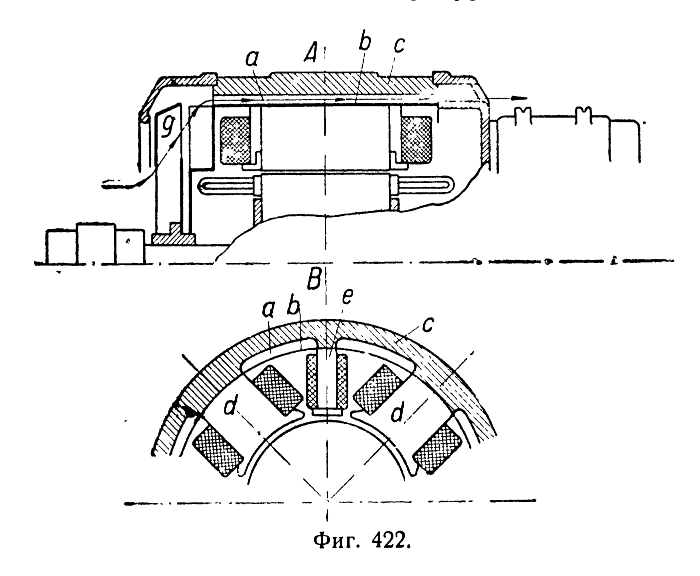
На фиг. 420 дан внешний вид такого двигателя.

На фиг. 421 показана другая, более простая конструкция

закрытого двигателя с охлаждением. Как видно из фигуры, полюса, обмотка якоря и коллектор этого двигателя совершенно закрыты.

Охлаждающий воздух просасывается при помощи вентилятора, расположенного слева; при этом непосредственно омываются охлаждающим воздухом только внутренние каналы в железе якоря и внутренняя поверхность коллектора.[1]

§ 220. Машины с охлаждаемой станиной. На фиг. 422 показана система охлаждения, иногда применяемая в машинах постоянного тока. Как видно из этой фигуры, машина — закрытого



Фиг. 422.

типа; вентилятор *g* продувает воздух через щель *a*, образованную внутри цилиндрической поверхности станины *c* и кожуха *b* из листового металла (направление струй охлаждающего воздуха показано по фигуре стрелками.[2] Коллектор на фигуре не виден (он расположен с правой стороны якоря).

ГЛАВА ДВАДЦАТЬ СЕДЬМАЯ

КОНСТРУКЦИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН ПОСТОЯННОГО ТОКА

При том большом разнообразии в области конструкций электрических машин, которое наблюдается в настоящее время, дать исчерпывающий материал по этому вопросу затруднительно: этому вопросу понадобилось бы специально посвятить целую книгу.

---

[1] См. AEG-Mitteilungen № 4. 1925.

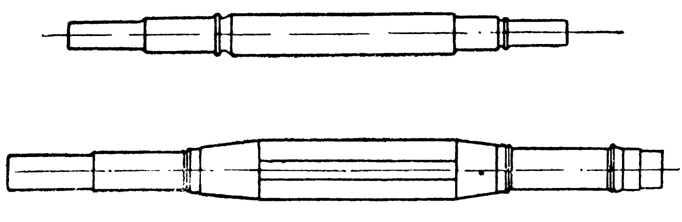
[2] „ETZ" № 97, 1930.

Поэтому здесь рассматриваются только немногие и более или менее типичные детали конструкций электрических машин постоянного тока.

§ 221. **Вал**. По большей части вал, на котором сидит якорь машины, покоится на двух подшипниках, причем шкив бывает расположен „навесу". Иногда при больших натяжениях ремня приходится располагать третий подшипник, причем ременный шкив располагается между двумя подшипниками.

Материалом, из которого изготовляется вал, чаще всего бывает сталь, реже сварочное железо.

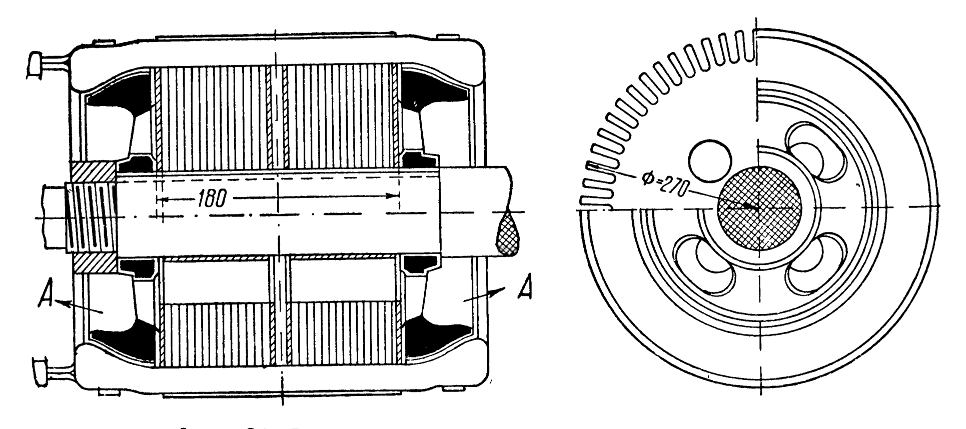
На фиг. 423 показаны примерные конструкции валов.



Фиг. 423. Конструкции валов.

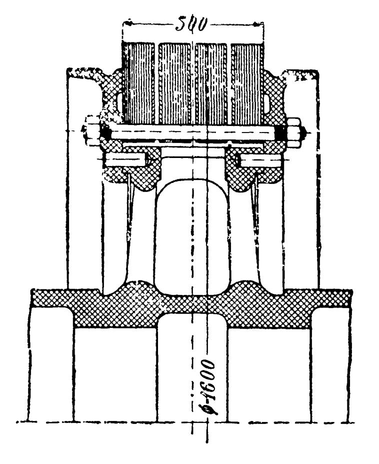
При расчете валов необходимо учитывать возможность изгиба вала в случае эксцентрического положения якоря относительно полюсов, благодаря чему может появиться одноосное магнитное притяжение.

§ 222. **Железо якоря**. Как было сказано выше, сердечник якоря набирается из железных листов, проклеенных для изоляции бумагой или покрытых для этой цели лаком.

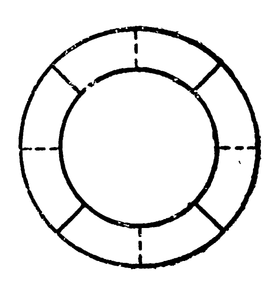


Фиг. 424. Якорь небольшой машины постоянного тока.

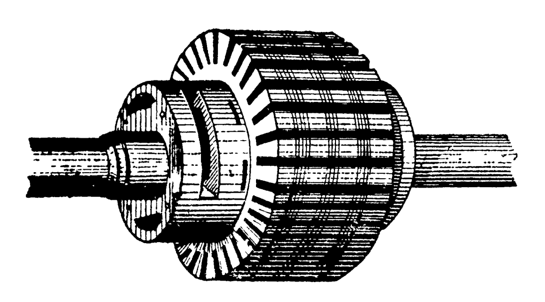
Толщина железных листов якоря бывает $\Delta = 0{,}5$ mm или $\Delta = 0{,}35$ mm. При больших частотах $f = \frac{pn}{60}$ рекомендуется брать малое Δ для уменьшения потерь на токи Фуко.



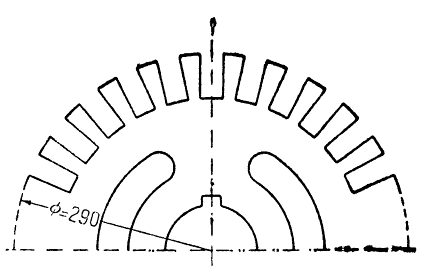
Фиг. 425. Якорь большой мощности.



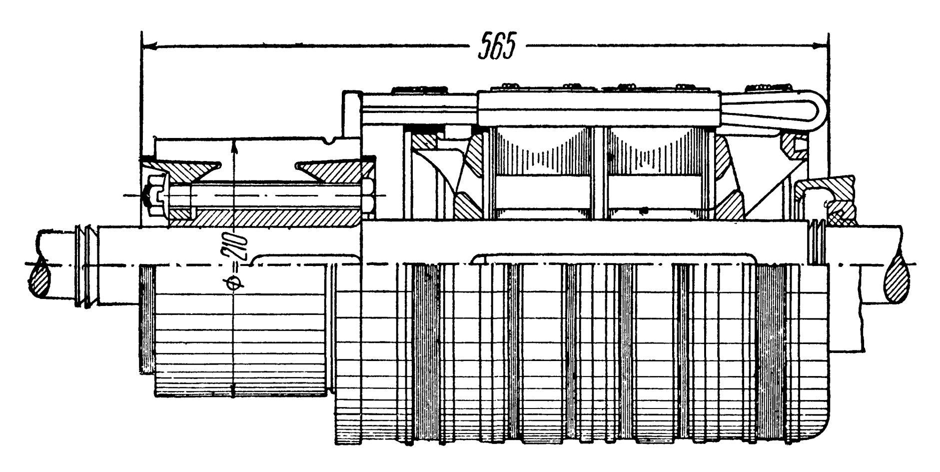
Фиг. 426. Железо якоря



Фиг. 427. Необмотанный якорь конструкции завода „Динамо" им. Кирова.



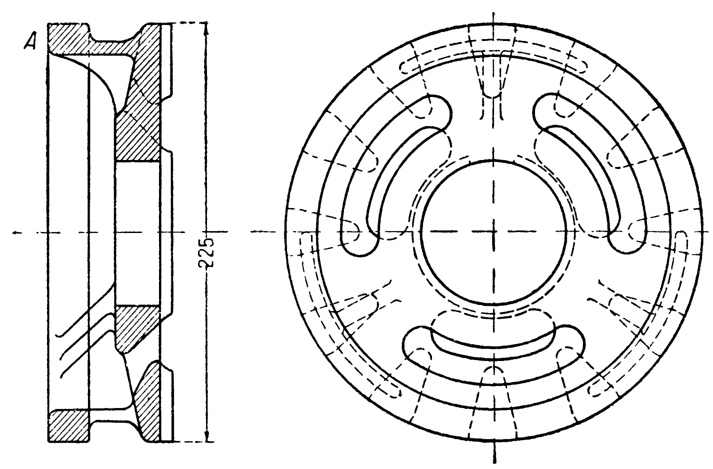
Фиг. 428. Железо якоря машины малой мощности (завод „Динамо" им. Кирова).



Фиг. 429. Якорь машины постоянного тока (завод „Динамо" им. Кирова).

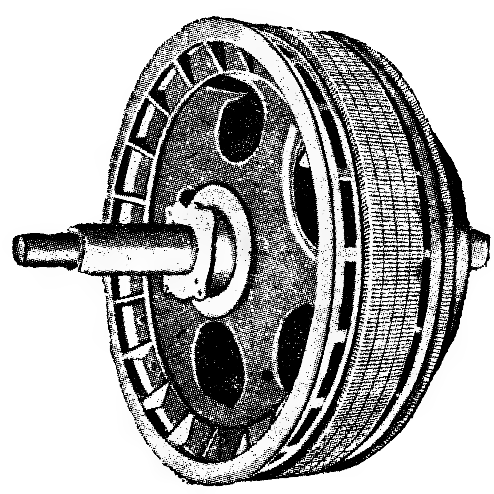
Концевые листы обычно делаются большей толщины ($\Delta = 2$—3 mm) для придания большей жесткости всей системе.

На фиг. 424 показана конструкция небольшого якоря; при таких небольших якорях железо якоря обычно прямо насажи-



Фиг. 430. Нажимное кольцо сердечника (конструкция завода „Динамо" им. Кирова).

вается на вал. На фиг. 424 *A* и *A* означают две нажимных шайбы, при помощи которых спрессовывается весь якорь. Нажимные шайбы обычно имеют диаметр, доходящий только до основания пазов.



Фиг. 431. Якорь (необмотанный) машины большой мощности.

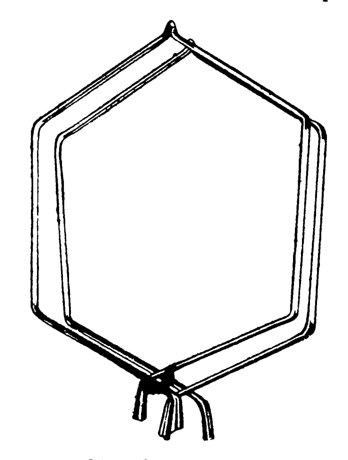
На фиг. 425 показана схематически конструкция железа якоря относительно большого диаметра.

При якорях диаметром $\leqslant 600$ mm железные листы штампуются сразу из одного куска железа. При больших диаметрах приходится якорь набирать из отдельных секторов; последние собираются при этом таким образом, что стыки не совпадают друг с другом (фиг. 426). На фиг. 427, 428, 429 показаны железо и конструкция якоря двигателя средней мощности (около 30 *л. с.*) московского завода „Динамо".

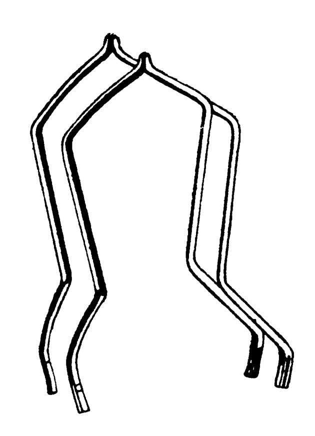
На фиг. 430 отдельно показана нажимная шайба; на цилиндрическом выступе *A*, видном на чертеже, покоится торцевая часть обмотки якоря.

На фиг. 431 показана конструкция якоря машин большой мощности.

§ 223. Обмотка якоря. В настоящее время обмотка якоря машины постоянного тока в большинстве случаев составляется из отдельных секций, которые предварительно изготовляются

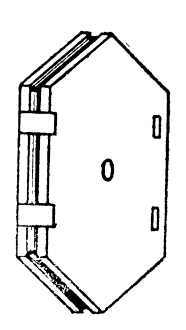


Фиг. 432. Секция петлевой обмотки.

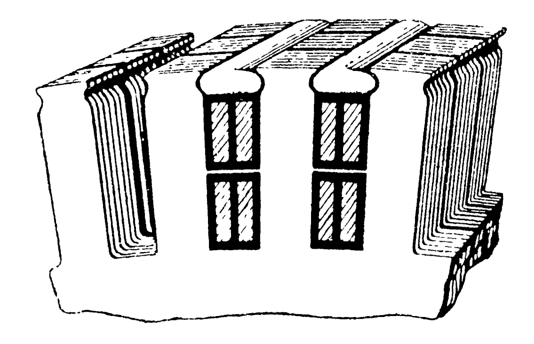


Фиг. 433. Секция волновой обмотки.

на специальных шаблонах. Такой способ изготовления обмотки не только удешевляет ее фабрикацию, но также дает возможность изолировать ее совершенным образом.



Фиг. 434. Шаблон для изготовления секции обмотки якоря.



Фиг. 435. Перспективный вид пазов.

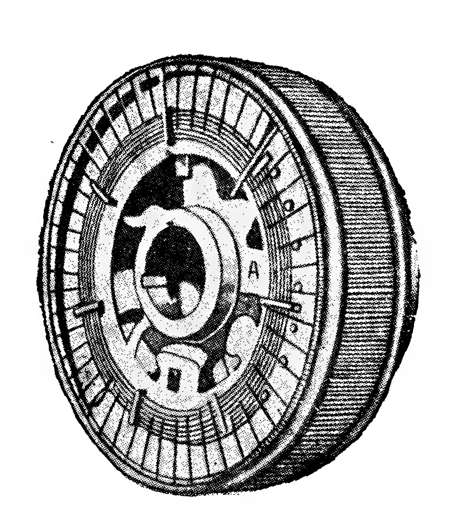
На фиг. 432 и 433 показаны две готовые секции: одна для петлевой обмотки, другая для волновой.

На фиг. 434 показан шаблон для изготовления секций.

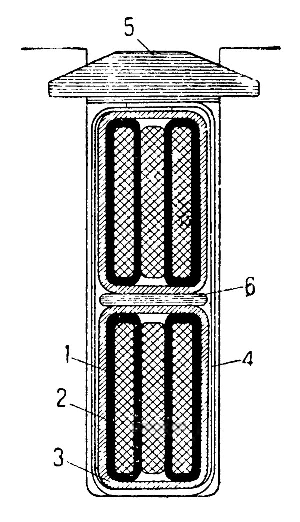
На фиг. 435 показано несколько пазов обмотки якоря. Как видно из этой фигуры, в каждом пазу расположено по четыре изолированных друг от друга провода, причем укрепление всего пучка проводов происходит при помощи клина.

На фиг. 436 показан обмотанный якорь большой машины с эквипотенциальными соединениями A.

В современных конструкциях обычно на одном валу с якорем сидит вентилятор для улучшения охлаждения машины.



Фиг. 436. Якорь машины большой мощности. Видны эквипотенциальные соединения.



Фиг. 437.

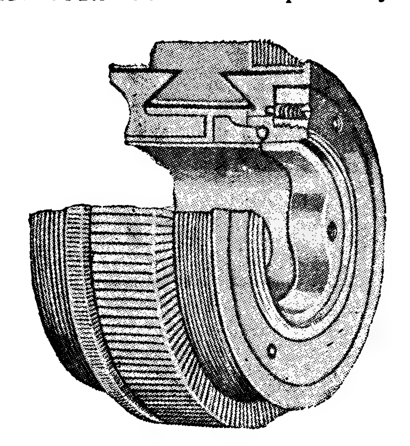
На фиг. 437 показан паз машины (завода „Динамо") на 440 V.

§ 224. Коллектор. Коллекторные пластины современных машин изготовляются из твердотянутой меди.

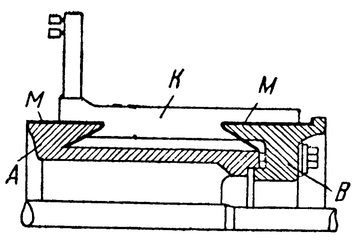
Изоляция между пластинами и от корпуса коллектора бывает слюдяная.

На фиг. 439 изображен коллектор в разрезе.

На этой фигуре обозначают:



Фиг. 438. Коллектор.



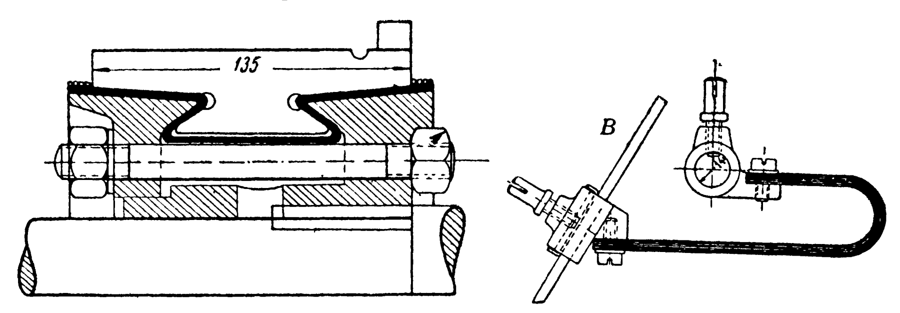
Фиг. 439. Коллектор.

A — корпус коллектора из чугуна или железа (последнее применяется при больших окружных скоростях);

B — нажимное кольцо;

К — коллекторная пластина;
М — слюдяная изоляция.

Как видно из фиг. 439, коллекторные пластины выполнены в виде „ласточкина хвоста". Изображенное справа на этой фигуре нажимное кольцо *В* притягивается к корпусу *А* при помощи болтов и дает, таким образом, надежное закрепление коллекторных пластин. На фиг. 438 показан в перспективном виде коллектор с вырезанной четвертью.

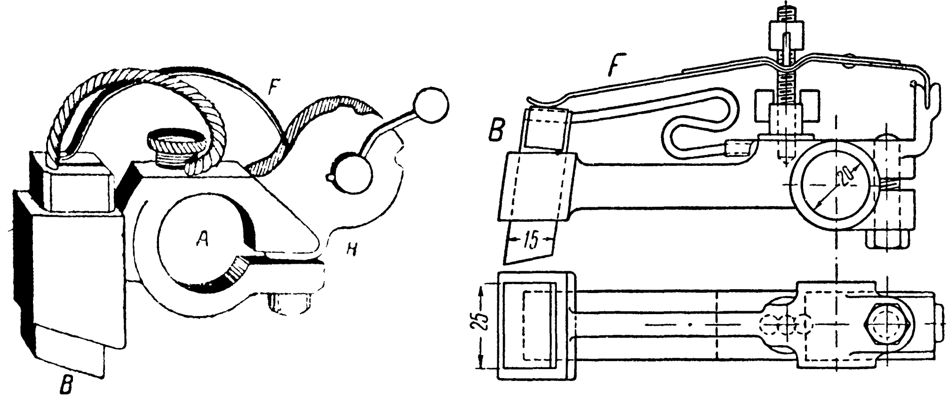


Фиг. 440. Коллектор машины малой мощности (завод „Динамо").

Фиг. 441. Медная щетка.

На фиг. 440 показана конструкция коллектора московского завода „Динамо", выполняемая обычно для машин небольших мощностей.

§ 220. Щетки и щеткодержатели. В настоящее время применяются почти исключительно угольные щетки. Медные щетки применяются только в редких случаях — в машинах низкого напряжения (например, для электролитических целей) (фиг. 441).

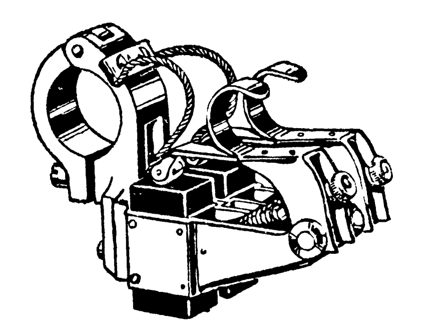


Фиг. 442. Угольная щетка и щеткодержатель.

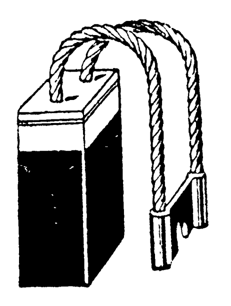
Фиг. 443. Угольная щетка и щеткодержатель (устарелая конструкция).

Причина вытеснения медных щеток угольными заключается в том, что коммутация при угольных щетках лучше, и в том обстоятельстве, что угольные щетки меньше срабатывают коллектор, чем медные; кроме того, уход за угольными щетками проще, чем за медными.

На фиг. 442—445 показаны конструкции угольных щеток. На этих фигурах угольная щетка обозначена буквой *B* и щеткодержатель—*H*. Пружина, прижимающая щетку к коллектору, обозначена *F*.

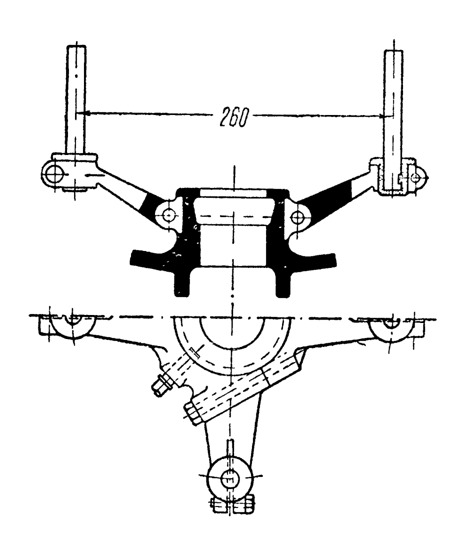


Фиг. 444. Щеткодержатель со щеткой.



Фиг. 445. Угольная щетка.

В хороших щеткодержателях положение угольной щетки относительно цилиндрической поверхности коллектора при работе должно оставаться неизменным, щетка должна срабатываться равномерно и не должна вибрировать. Щеткодержатели насаживаются обычно на так называемые щеточные стержни отверстием *A* (фиг. 442); щеточные стержни должны быть хорошо изолированы от корпуса машины (фиг. 446).

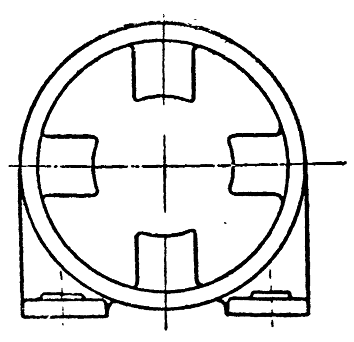


Фиг. 446. Укрепление щеточных болтов.

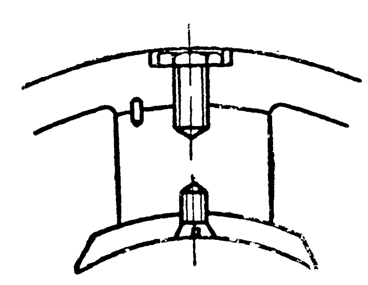
§ 226. Полюса и станина. Полюсные наконечники обычно изготовляются из листового железа или реже кованого; сердечники могут изготовляться из листового железа, кованого или стального литья; станина обычно изготовляется из чугуна или стального литья. Самая простая конструкция станины с полюсами (теперь редко применяемая) показана на фиг. 447. Здесь сердечники полюсов и станина отлиты в виде одного целого.

В конструктивном отношении эта система очень проста; она, однако, обладает тем недостатком, что при такой системе магнитная индукция в воздушном зазоре имеет приблизительно ту же величину, что и в самом сердечнике.

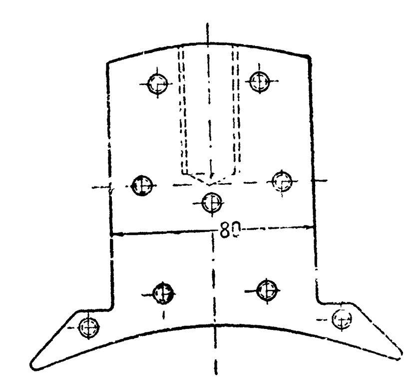
Обычно в современных машинах к сердечникам приверты-

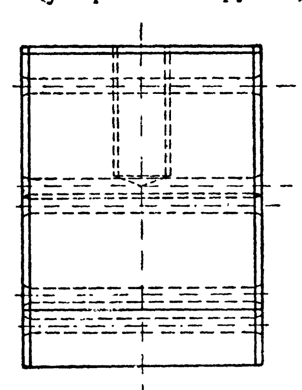


Фиг. 447. Станина с полюсами (устарелая конструкция).

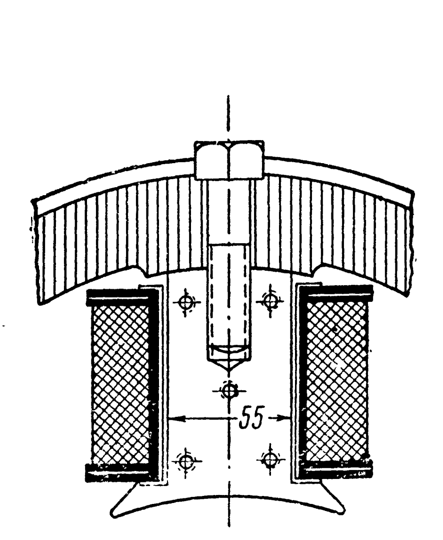


Фиг. 448. Полюс с наконечником (устарелая конструкция).

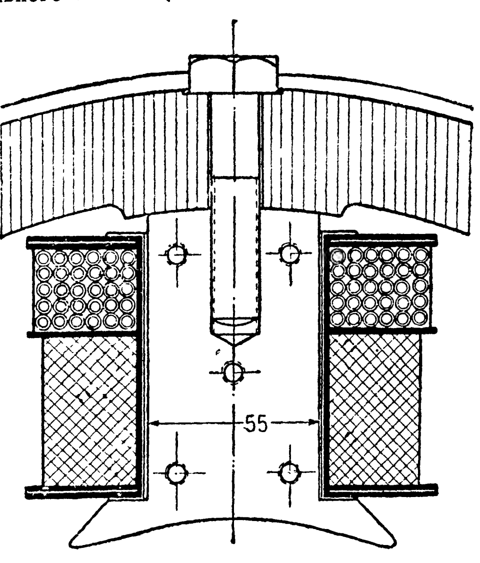




Фиг. 449. Сердечник главного полюса (завод „Динамо").



Фиг. 450. Полюс с шунтовой обмоткой (завод „Динамо").



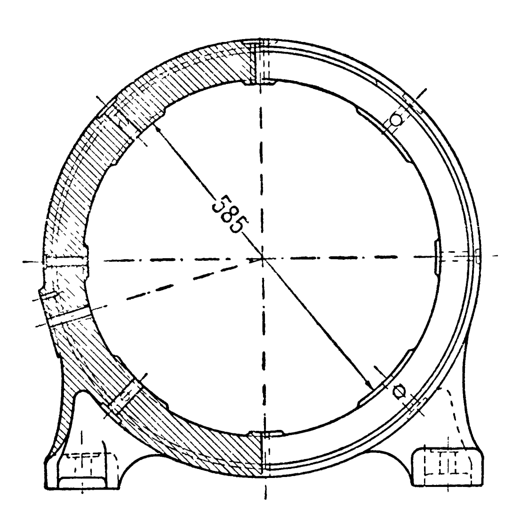
Фиг. 451. Полюс с компаундной обмоткой (завод „Динамо").

ваются полюсные наконечники, рабочая поверхность которых превосходит обычно полезное сечение полюса в $1^1/_2 - 2^1/_2$ раза. На фиг. 448 показан полюсный сердечник с привернутым к нему полюсным наконечником. На фиг. 449 — 451 показаны конструкции полюсов завода „Динамо“.

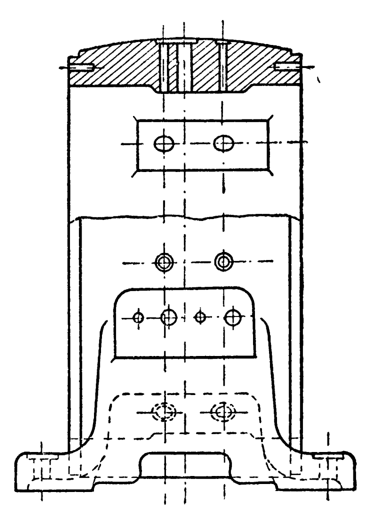
Фиг. 452. Сердечник дополнительного полюса (завод „Динамо“).

Как видно из этих фигур, здесь полюсный сердечник и наконечник составляют одно конструктивное целое. Весь полюс набран из железных листов (обычная толщина бывает $\Delta = 0{,}5$ mm), стянутых в один железный пакет при помощи ряда болтов с утопленными головками. Два крайних листа полюса обычно делаются для жесткости большей толщины ($\Delta = 2 - 3$ mm).

На фиг. 452 показан сердечник дополнительного полюса. Эти полюса обычно изготовляются из кованого железа. В редких



Фиг. 453. Станина машины средней мощности.



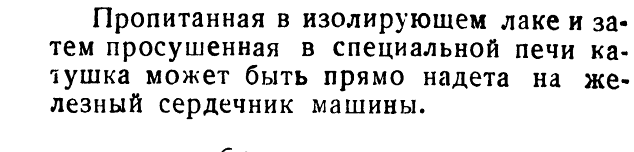
Фиг. 454. Станина машины средней мощности (завод „Динамо“).

случаях при больших мощностях машины дополнительные полюса изготовляются также из листового железа.

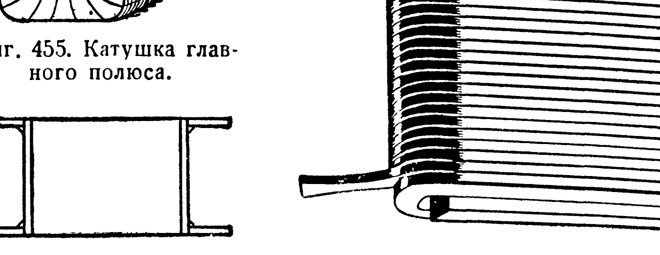
На фиг. 453, 454 показана станина машины средней мощности, изготовляемая заводом „Динамо“.

§ 227. **Катушки электромагнитов**. Обмотка полюсов при большом сечении провода (например, для сериесных машин) нама-

тывается предварительно на шаблоне и затем тщательно изолируется многими оборотами изолирующей бумаги и хлопчатобумажной ленты.



Пропитанная в изолирующем лаке и затем просушенная в специальной печи катушка может быть прямо надета на железный сердечник машины.



Фиг. 455. Катушка главного полюса.

Фиг. 456. Каркас катушки возбуждения.

Фиг. 457. Дополнительный полюс.

На фиг. 455 изображена такая катушка возбуждения трамвайного двигателя.

Катушки возбуждения шунтовых машин, имеющие обычно проволоку относительно небольшого сечения, наматываются по большей части прямо на железный каркас, внешняя поверхность которого предварительно оклеивается для изоляции бумагой и картоном достаточной толщины (2 — 3 mm).

На фиг. 456 изображен такой каркас.

На фиг. 457 показан отдельно дополнительный полюс машины большой мощности. Как видно из этой фигуры, обмотка дополнительного полюса состоит из ряда витков медной полосы, гнутой „на высокое ребро".

На фиг. 458 показана станина с полюсами и компенсационной обмоткой большого генератора, служащего для питания больших двигателей, приводящих в движение прокатные станы.

Основные нормальные данные электродвигателей постоянного тока, изготовляемых современными заводами.

(Завод им. Кирова „Электросила" в Ленинграде, ХЭМЗ — Харьковский электромеханический завод им. Сталина, ЯГЭМЗ – Ярославский электромашиностроительный завод, завод Вольта в г. Баранча, Урал).

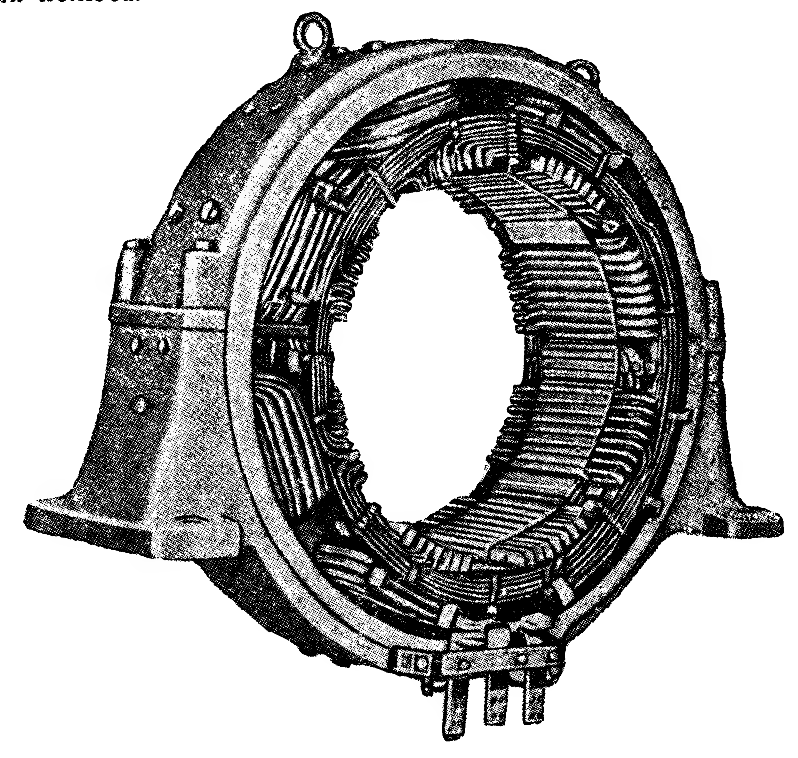
В следующей таблице (стр. 358) приведены данные, характеризующие веса и размеры машин постоянного тока типа ПН, выпускаемые заводами СССР.

Следует отметить, что машины 4 ПН 5, ПН-10, ПН-17,5 выполняются двухполюсными с одним вспомогательным полюсом, все

Основные нормальные данные электродвигателей постоянного тока ПН в защищенном исполнении

		ПН-5	ПН-10	ПН-17,5	ПН-28,5	ПН-45	ПН-68	ПН-85	ПН-100	ПН-145	ПН-205	ПН-290	ПН-400	ПН-500	ПН-750	ПН-1 000	ПН-1 320	ПН-1 750
1. Мощность мотора в kW		0,5	1	1,75	2,85	4.5	6,8	10,6	10	14,5	20,5	29	40	55	75	100	132	175
2. Число оборотов		1 430	1 410	1 420	1 420	1 430	1 440	1 440	950	950	950	950	950	950	950	950	970	970
3. Внешний диаметр станины		222	262	272	317	317	363	363	495	495	595	595	630	680	800	800	925	925
4. Внутренний » »		196	232	244	287	287	327	327	440	440	530	530	590	590	700	700	810	810
5. Внешний диаметр якоря		98	118	130	160	160	185	185	245	245	295	295	340	340	410	410	475	475
6. Длина железа якоря		90	110	118	65	100	95	160	80	120	100	140	140	190	150	200	165	220
7. Длина полюса		90	110	118	35	100	95	160	80	120	95	135	135	185	145	195	160	215
8. Число полюсов	главных	2	2	2	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4
	вспомогат.	1	1	1	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4
9. Диаметр коллектора		60	70	75	125	125	125	125	170	170	200	200	250	250	300	300	350	350
10. Длина		41	41	40	42	42	42	65	65	65	65,95	65,95	120	160	160	200	240	310
11. Воздушн. зазор	главный	0,7	0,8	0,8	1	1	1,5	1,5	2,5	2,5	2,5	2,5	3	3	4	4	5	5
	вспомогат.	0,7	0,8	0,8	1,5	1,5	2	2	3	3	4	4	4	4	5	5	6	6
12. Вес меди якоря в kg		0,96	2,5	3,17	3,05	3,6	5,55	7,4	14	15,5	22	27	27	30	45,5	50	66	71
13. Вес меди:	главн. пол.	1,91	3,044	4,1	4,69	6,45	8,2	10,93	14	16,5	22	25,4	36,4	42,7	61	69,5	66	79
	вспом. пол.	0,68	1,35	1,92	2,3	2,45	4,9	5,5	10,2	12,3	20	24	35,2	42,4	38	45,2	64,5	76,5
14. Общий расход обмоточной меди на машину (без коллектора)		3,55	6,894	9,19	10,04	12,50	18,65	23,83	38,2	44,3	64	76,4	98,6	115,1	144,5	164,7	196,5	226,5
15. Удельный расход обмоточной меди в kg на 1 kW		7,1	6,894	5,25	3,55	2,78	2,75	2,24	3,82	3,05	3,12	2,64	2,37	2,1	1,93	1,647	1,49	1,3
16. Общий вес защищенной машины без шкива		39	60	72	82	98	123	160	260	320	470	550	—	750	—	1 200	1 450	—

остальные типы серии имеют по 4 главных и 4 дополнительных полюса.



Фиг. 458. Станина генератора постоянного тока завода Броун - Бовери 460 V, 3 400 A, $n = 750 \div 600$ об/мин.

Из таблицы видно, что вся разработанная советская нормальная серия электрических машин постоянного тока на 17 различных мощностей укладывается в 10 диаметров якоря в пределах от $D = 196$ mm до $D = 810$ mm.

ГЛАВА ДВАДЦАТЬ ВОСЬМАЯ

О РАСЧЕТЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН

Расчет всякой электрической машины обычно сводится к решению некоторой системы уравнений со многими неизвестными, причем число неизвестных обычно бывает больше числа самых уравнений. Поэтому расчет электрической машины в общем представляет собой неопределенную задачу со многими решениями.

Из всех этих решений конструктору предоставляется возможность выбора одного, которому соответствовала бы наиболее совершенная машина как с точки зрения ее рабочих свойств, так и с точки зрения стоимости.

Поясним сказанное.

При расчете электрической машины приходится исходить из уравнения э. д. с. якоря; последнее в общем виде может быть выражено так:

$$E = C \cdot \Phi \cdot N,$$

где Ф — магнитный поток возбуждения;

N — число активных проводов якоря;

C — некоторая постоянная, зависящая от некоторых конструктивных данных машины.

Исследуя уравнение мы видим, что для любой величины магнитного потока Ф можно найти соответственное число проводов якоря N, при котором получается данная величина э. д. с. E машины.

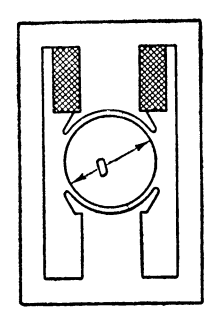
§ 228. **Расчетные варианты.** Задаваясь различными величинами Ф и определяя из уравнения соответственные значения N, мы будем получать различные варианты проекта электрической машины на данную величину E.

Можно, например, задаться большой величиной Ф, тогда при данном диаметре якоря D и данной его длине получится малое N и, наоборот, при малом Ф получится большое N.

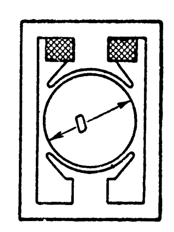
Таким образом мы можем получить два варианта, характеризуемые нижеследующей таблицей:

I вариант	II вариант
Ф — большое N — малое	Ф — малое N — большое

При первом варианте мы получаем машину с малым относительно количеством медных проводов N на якоре (малый общий вес Cu в якоре), но с магнитной цепью относительно больших сечений (большой вес магнитной цепи Fe); при втором варианте, наоборот, у нас получается большое количество меди (Cu) в якоре, но относительно малые размеры магнитной цепи (Fe).



Фиг. 459.



Фиг. 460.

На фиг. 459 и 460 показаны в виде примерных эскизов вышеуказанные два варианта.

Вариант I (фиг. 459) будет, таким образом, характеризоваться относительно малым весом меди на якоре, но большим весом магнитной цепи; вариант II (фиг. 460), наоборот, будет отличаться относительно большим весом меди якоря, но малым весом магнитной цепи.

Несмотря на то, что вес меди якоря в варианте II получается относительно большим, размеры полюсов и ярма, а в связи с этим внешние размеры и общий вес машины получаются при этом варианте в общем меньшими.

Так как стоимость машины при известных допущениях является функцией всего веса машины, то отсюда ясно, что при варианте II (много Cu и мало Fe) получаются, вообще говоря, машины дешевле, чем при варианте I.

Поэтому современные заводы при разработке нормальных проектов машин часто стремятся приблизиться к варианту II.

Прежде чем переходить к выводу основного уравнения, которое дает возможность найти размеры машины, дадим понятие о тех величинах, которые затем при расчете машин часто будут встречаться.

§ 229. Главные размеры машины. К главным размерам машины всюду в дальнейшем будем относить диаметр якоря D и так называемую расчетную длину якоря l_i, которая, как будет видно из дальнейшего, вообще несколько отличается по своей величине от действительной длины якоря l_1 (по чертежу).

Кроме того, при расчете часто придется также встречаться с расчетной шириной полюсной дуги b_i, также отличающейся несколько по своей величине от действительной ширины полюсной дуги b (по чертежу).

Понятия об этих величинах даются в нижеследующих параграфах.

§ 230. Расчетная длина якоря. Так как якорь машины имеет обычно вентиляционные каналы, то магнитная индукция в воздушном зазоре обычно распределяется неравномерно по его длине.

Примерная кривая распределения магнитной индукции в воздушном зазоре для якоря, имеющего три вентиляционных канала, изображена на фиг. 461.

Фиг. 461. Кривая распределения магнитной индукции в воздушном промежутке под полюсным наконечником вдоль оси якоря (на фигуре $l_p = l_1$).

Для удобства расчета при проектировании машины обычно предполагают, что индукция в воздушном зазоре всюду имеет постоянную величину, равную B_l.

Для того чтобы избежать при этом допущении ошибки при подсчете величины потока машины, в расчет следует вводить не всю длину якоря l_1 (включая суммарную длину железных пакетов и вентиляционных прослоек), а некоторую другую длину l_i, которая может отличаться от действительной длины якоря по чертежу l_1.

В дальнейшем мы будем называть величину l_i — **расчетной длиной якоря**, а **величину** l_1 — **конструктивной длиной якоря**.

Величину l_i в каждом данном случае можно найти графически, если известны размеры якоря и размеры наконечников полюсов машины.

Для этой цели необходимо построить по методу силовых трубок кривую распределения магнитной индукции B_l в воздушном зазоре согласно фиг. 461.

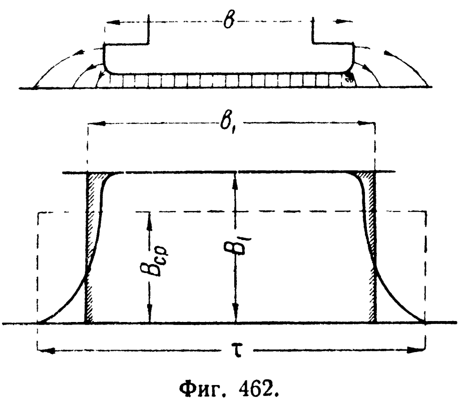
Спланиметрировав эту кривую и построив равновеликий прямоугольник с высотой B_l, найдем длину основания этого прямоугольника, которая и будет равна искомой величине l_i.

На практике в большинстве случаев можно пользоваться следующей эмпирической формулой:

$$l_i = l + kn_s b_s, \qquad (231,1)$$

где l — общая длина железных пакетов якоря (фиг. 461);
n_s — число вентиляционных каналов;
b_s — ширина вентиляционного канала.

По Арнольду[1] можно брать $k = \frac{2}{3}$, так что формула (231,1) приобретает вид



Фиг. 462.

$$l_i = l + \frac{2}{3} n_s b_s.$$

Рихтер[2] советует брать несколько меньшую величину $k = \frac{1}{2}$.

§ 231. Расчетная величина полюсной дуги. Для определения величины магнитного потока электрической машины кроме величины l_i еще нужно знать также другую величину: расчетную ширину полюсной дуги b_l. Эта величина может быть найдена таким же способом, что и l_i (фиг. 462).

Для этой цели, спланиметрировав кривую магнитной индукции B_l, построим равновеликий прямоугольник с высотой B_l. Ширина основания прямоугольника, полученного таким образом, будет равна расчетной ширине полюсной дуги b_l.

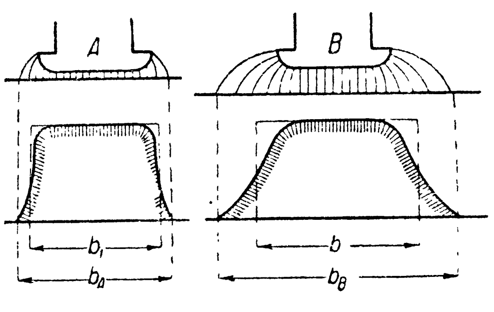
Величина b_i в значительной мере зависит от величины воздушного зазора δ.

На фиг. 462а показаны для сравнения два полюсных наконечника A и B совершенно одинаковой величины и формы; но под одним из этих полюсных наконечников A воздушный за-

[1] Arnold, Gleichstrommaschinen.
[2] Richter, Elektrische Maschinen.

зор δ **невелик**, а под другим наконечником B воздушный зазор δ имеет значительную величину.

Сравнивая кривые магнитной индукции под полюсами A и B, мы видим, что магнитные силовые линии по выходе из полюса во втором случае распространяются на большую ширину b_B части окружности якоря, чем в первом случае b_A, т. е. мы имеем $b_B > b_A$ (фиг. 462а). Таким образом мы видим, что величины b_A и b_B являются некоторыми функциями величины воздушного зазора δ.



Фиг. 462а.

Ниже в таблице приведено несколько эмпирических формул для подсчета b_i, даваемых разными авторами.

	Для закругленных полюсных наконечников	Для заостренных полюсных наконечников
Арнольд (Arnold) .	$b_i = b + \delta$	$b_i = b + 2{,}5\delta$
Петерсен (Petersen)	$b_i = b\left(1 + \frac{\delta}{5}\right)$	
Гобарт (Hobart) . .	$b_i = 1{,}1b$	

Во всех вышеприведенных формулах:

b — действительная ширина полюсного наконечника;

b_i — расчетная ширина полюсной дуги;

δ — величина воздушного зазора.

При расчетах можно приближенно принимать в среднем

$$b_i \approx b + 2\delta.$$

§ 232. Величина магнитного потока, выходящего из одного полюса. Зная величины l_i и b_i, можем подсчитать величину потока, выходящего из полюса в якорь.

Условно принимая равномерно густое распределение магнитной индукции в воздушном зазоре ($B_l = \text{const}$) и предполагая, что поток Φ по выходе из полюсного наконечника распространяется на площадь $l_i b_i$, найдем величину потока

$$\Phi = B_l l_i b_i.$$

§ 233. Основное уравнение для расчета главных размеров машины. Основное уравнение представляет главные размеры машины (D и l_i) в функции ее мощности и быстроходности. Попытаемся найти это уравнение; для этой цели напишем уравнение мощности машины

$$P = UI\,10^{-3},$$

где P — мощность в киловаттах;

U — напряжение машины в вольтах;

I — ток в амперах.

Постараемся так преобразовать это уравнение, чтобы в него вошли главные размеры машины: D — диаметр якоря и l_i — длина якоря. Для этого перепишем уравнение в следующем приближенном виде:

$$P \approx E_a I_a \, 10^{-3}, \qquad (233,1)$$

где E_a — наведенная э. д. с. в якоре машины и I_a — ток в якоре.

Подставим в это уравнение выражения для E_a и I_a.

Электродвижущая сила машины E_a может быть выражена так:

$$E_a = \frac{pn}{60} \cdot \frac{N}{a} \Phi \, 10^{-8},$$

где N — число проводов якоря;

a — половинное число параллельных разветвлений якоря;

Φ — величина магнитного потока;

p — число пар полюсов;

n — число оборотов якоря в минуту.

Далее мы имеем

$$I_a = 2ai_a,$$

где i_a — ток в каждой параллельной ветви якоря.

Для того чтобы в выражение ввести величину диаметра якоря D, постараемся выразить величину тока i_a через линейную нагрузку якоря AS (т. е. число ампернроводов на 1 cm окружности якоря); мы имеем

$$AS\pi D = i_a N,$$

откуда

$$i_a = \frac{\pi DAS}{N};$$

таким образом

$$I_a = 2a \frac{\pi DAS}{N}.$$

Подставив найденное выражение в формулу (233,1), получим

$$P = \frac{pn}{60} \cdot \frac{N}{a} \Phi 2a \frac{\pi DAS}{N} 10^{-11}. \qquad (233,2)$$

В этой формуле появилась первая величина, характеризующая размеры машины — D, для того чтобы ввести в это уравнение другую характерную величину — l_i, продолжаем преобразование дальше. Мы можем написать следующее выражение для магнитного потока машины:

$$\Phi = B_l l_i b_i;$$

но b_i можно положить равным

$$b_i = \alpha_i \tau,$$

где $\alpha_i = \frac{b_i}{\tau}$ есть коэфициент угла охвата полюсной дуги.

Длина полюсного деления τ равна

$$\tau=\frac{\pi D}{2p};$$

таким образом мы имеем

$$b_i=\alpha_i\frac{\pi D}{2p}.$$

Учитывая все вышеприведенные соотношения, найдем величину магнитного потока

$$\Phi=B_l l_i \alpha_i \frac{\pi D}{2p};$$

подставив это выражение в уравнение (233,2), получим

$$P=\frac{pn}{60}\cdot\frac{N}{a}\alpha_i B_l l_i\frac{\pi D}{2p}2a\frac{\pi DAS}{N}10^{-11}.$$

После упрощений найдем

$$P=\frac{n}{60}B_l\alpha_i l_i\pi^2 D^2 AS\ 10^{-11};$$

так как $\pi^2\approx 10$, то

$$P=\frac{n}{60}B_l\alpha_i l_i D^2 AS\,10^{-10},$$

откуда

$$\frac{D^2 l_i n}{P}=\frac{6\cdot 10^{11}}{\alpha_i AS B_l}. \qquad (233,3)$$

Найденное нами основное уравнение (233,3) играет очень важную роль в теории расчета электрических машин. Оно дает указание на то, как зависят основные размеры машины (D и l_i) от принятых при расчете величин магнитной индукции B_l, линейной нагрузки якоря AS и других величин.

§ 234. Эмпирическая формула для быстрого и приблизительного определения диаметра машины. Как видно из предыдущего, расчет основных размеров электрической машины представляет собой довольно сложную процедуру.

Автор настоящей книги сделал попытку сокращения этой процедуры расчета и вывел полуэмпирическую формулу [1] следующего вида:

$$D=(100\div 120)\sqrt[3]{\frac{P}{n}}.$$

Это соотношение показывает, что диаметр машины возрастает прямо пропорционально корню третьей степени от мощности машины P и обратно пропорционально кубичному корню от числа оборотов в минуту.

[1] См. „Вестник теоретической и экспериментальной электротехники“, 1928, № 2, статью К. Шенфер „Новый вид уравнения для расчета основных размеров электрических машин постоянного тока“.

Предположим для примера, что требуется определить диаметр машины мощностью в 11 kW и $n = 1\,000$ об/мин.

Применяя эту формулу, найдем

$$D = (100 \div 120)\sqrt[3]{\frac{11}{1\,000}} = 22{,}2 \div 26{,}5 \text{ cm}.$$

Этот пример приведен в книге проф. Рихтера „Elektrische Maschinen", I, стр. 556, изд. 1924 г. Данные этой машины следующие: 11 kW; $n = 1\,000$ об/мин; $D = 21$ cm. Таким образом на этом примере можно убедиться, что вышеприведенная эмпирическая формула дает довольно правдоподобные результаты в смысле выбора диаметра машины.

§ 235. Физический смысл основного уравнения. Для того чтобы уяснить себе физический смысл основного уравнения (233,3), перепишем его в несколько ином виде, перенеся n в правую часть уравнения:

$$\frac{D^2 l_i}{P} = \frac{6 \cdot 10^{11}}{n \alpha_i B_l AS}. \tag{235}$$

Левая часть этого уравнения пропорциональна величине, которую можно назвать „удельным объемом" якоря машины, т. е. объемом, отнесенным к единице мощности машины.

Для того чтобы убедиться в последнем, достаточно числителя и знаменателя левой части выражения (235) помножить на $\frac{\pi}{4}$; тогда в числителе левой части выражения (235) мы получим объем якоря машины, а в знаменателе будет при этом находиться мощность машины P, помноженная на $\frac{\pi}{4}$.

Исследуя уравнение (235), мы видим, что размеры машины получаются тем меньше, чем большим являются n, α_i, AS и B_l.

Попытаемся выяснить влияние каждой из перечисленных величин на размеры машины.

§ 236. Зависимость между диаметром машины и крутящим моментом. Вращающий момент машины, выраженный в килограммометрах, может быть выражен следующим образом:

$$M = 975\frac{P}{n}.$$

Представляет интерес выяснить, в какой зависимости находится диаметр якоря машины от величины крутящего момента:

$$D = f(M) = f\left(\frac{P}{n}\right).$$

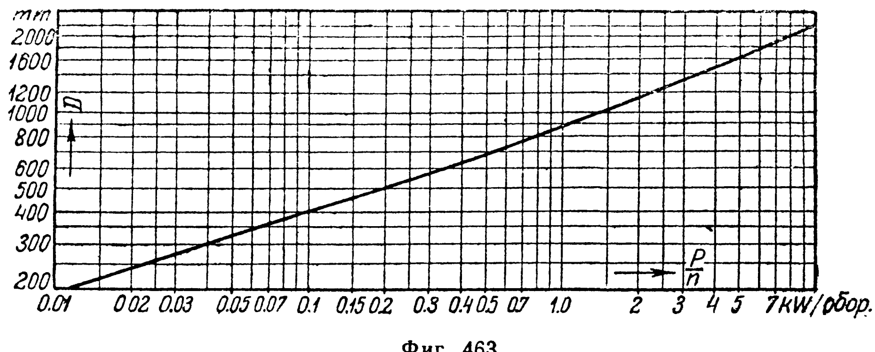
На фиг. 463 представлена кривая зависимости между диаметром машины и отношением $\frac{P}{n}$, измеренным в киловаттах на один оборот $\left(\frac{\text{kW}}{n}\right)$.[1]

[1] Лифшиц, т. III, стр. 293.

Таким образом мы видим, что с возрастанием крутящего момента увеличивается диаметр якоря.

Кривая фиг. 463 дает возможность нахождения диаметра машины, если задана мощность машины P и ее число оборотов в минуту n.

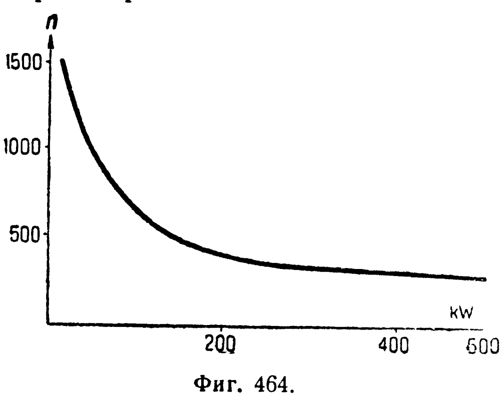
Предположим, например, что требуется найти в первом приближении диаметр двигателя постоянного тока мощностью $P = 200$ kW при $n = 1\,000$ об/мин.



Фиг. 463.

Для этой цели сначала найдем отношение $\frac{P}{n} = \frac{200}{1\,000} = 0{,}2$ kW, затем по кривой фиг. 463 для этого значения $\frac{P}{n}$ найдем соответственную величину диаметра якоря машины $D = 500$ mm.

§ 237. Влияние быстроходности на размеры машины. Как видно из уравнения (235), число оборотов машины в минуту n входит в знаменатель этого уравнения; отсюда следует, что с повышением n, размеры машины D и l_i, как и следовало ожидать, должны уменьшаться.



Фиг. 464.

При выборе n следует иметь в виду величину окружной скорости якоря машины v. Величина v может получить разные значения в зависимости от заданных наперед условий работы машины и от типа машины.

Так, например, при тихоходных машинах, сидящих на одном валу с первичным двигателем, окружная скорость часто опускается до величины $v = 8$ m/sec.

В машинах, работающих от ременной передачи, окружная скорость обычно колеблется в среднем в пределах $v = 12 \div 17$ m/sec.

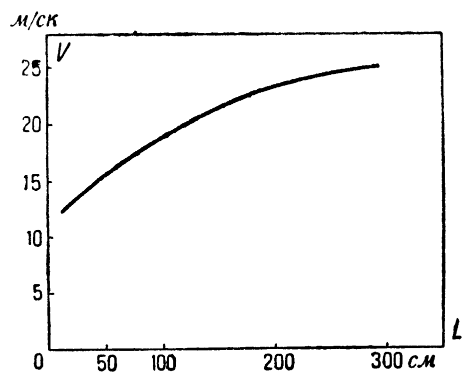
В машинах быстроходного типа, например, турбогенераторах, окружная скорость бывает значительно больше приведенных выше значений и достигает часто 90 m/sec и выше.

Как общее правило, с увеличением мощности машины нормальное число оборотов в минуту машины n обычно соответственным образом уменьшается.

Объяснения этому следует искать в следующем:

С увеличением мощности машины растут также размеры саомй машины; для того чтобы при этом окружная скорость не возрастала выше нормы, приходится число оборотов машины в соответственной мере уменьшать.

Сказанное поясняет фиг. 464, на которой показана примерная кривая нормально встречающихся чисел оборотов в минуту n в функции мощности машины в киловаттах.



Фиг. 465. Часто встречающиеся величины окружных скоростей v m/sec в функции диаметра якоря D.

На фиг. 465 даны величины часто встречающихся на практике окружных скоростей в функции диаметра якоря.

Величина окружной скорости $v = 20$ m/sec лет двадцать пять назад считалась достаточно высокой.

Лет пятнадцать назад уже стали строить машины постоянного тока с окружной скоростью в $v = 30 - 40$ m/sec. В настоящее время можно привести ряд примеров, когда эта окружная скорость доходит до 50 и 60 m/sec (быстроходные машины, конвертеры, генераторы для водяных турбин и т. п.).

При больших значениях окружной скорости мы должны считаться также с затруднениями механического характера, вызванными большими центробежными силами.

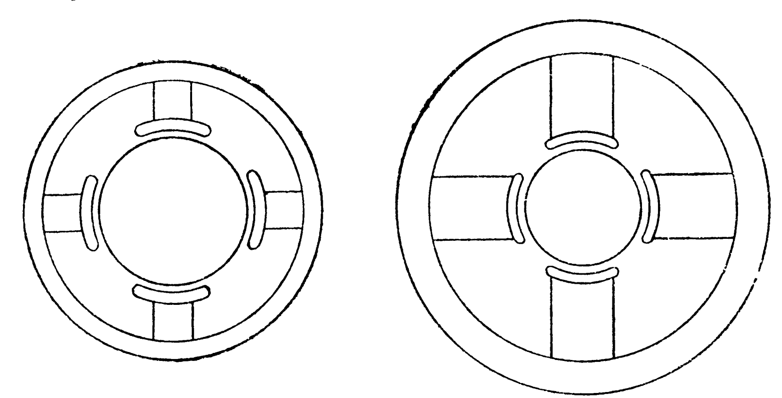
Опыт показывает, что с возрастанием окружной скорости коллектора все труднее и труднее удается обеспечить спокойную работу щеток на коллекторе, неисполнение последнего требования часто служит причиной искрения на коллекторе даже при наличности дополнительных полюсов.

§ 238. Влияние коэфициента магнитного перекрытия α_i. Коэфициент α_i входит в знаменатель выражения (233,3), отсюда ясно, что с возрастанием α_i диаметра якоря D должен в соответственной мере уменьшаться. Поэтому на первый взгляд может показаться, что следует стремиться к возможно большим значениям α_i. Однако при больших значениях α_i мы наталкиваемся на следующее затруднение:

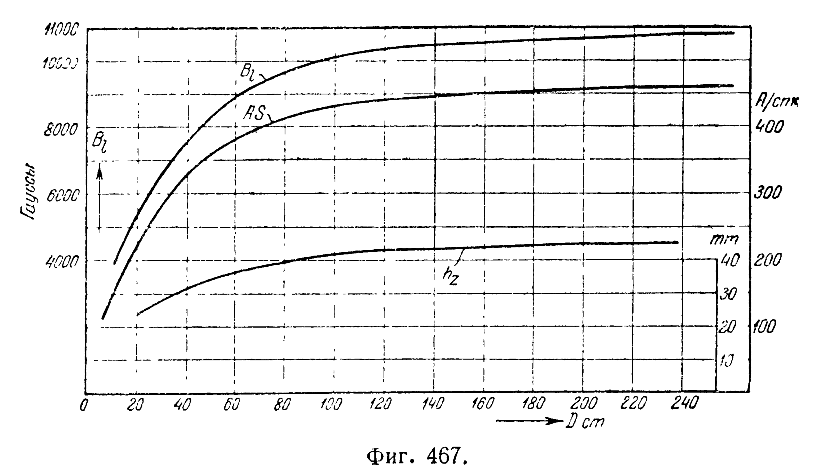
Благодаря сближению между собой краев полюсных наконечников разной полярности увеличивается магнитное рассеяние

главных полюсов, что требует соответственного усиления обмоток возбуждения и увеличения сечения магнитных сердечников и станины. Обычно величина α_i в среднем колеблется в пределах от 0,65 до 0,75 в машинах, не имеющих дополнительных полюсов, и в пределах от 0,5 до 0,72 в машинах, имеющих дополнительные полюса.

§ 239. Влияние величины B_l на размеры машин. Как показывает уравнение (233,3), с возрастанием B_l и AS размеры якоря машины уменьшаются. На первый взгляд может показаться, что



Фиг. 466. Влияние относительной величины B_l и AS на внешние размеры машины. Левый чертеж: AS и B_l — малые. Правый чертеж: AS и B_l — большие. Несмотря на уменьшение диаметра якоря последнего варианта (правый чертеж), внешние размеры этого варианта, однако, больше, чем для первого варианта (левый чертеж).



Фиг. 467.

и общие размеры машины также должны непрерывно уменьшаться с возрастанием B_l и AS. Последнее, однако, справедливо лишь до известного предела. Дело в том, что при возрастании B_l увеличивается также потребное число ампервитков возбуждения, что в свою очередь требует соответственного удлинения

полюсов для того, чтобы можно было разместить катушки электромагнитов.

Таким образом при подсчете различных вариантов с постепенным увеличением B_l в каждом частном случае может наступить некоторый предел, после которого, несмотря на уменьшение диаметра якоря D, мы будем получать у в е л и ч е н и е в н е ш н и х р а з м е р о в машины благодаря возрастанию длины полюсов и размеров станины (фиг. 466).

Кроме того, чрезмерное увеличение B_l невыгодно в отношении потерь; при возрастании B_l соответственным образом увеличивается магнитная индукция в зубцах и других частях магнитной цепи и возрастают в связи с этим потери на гистерезис и токи Фуко в железе.

Обычно при расчете машины берут величину B_l больше для машин с большим диаметром D и, наоборот, при малых D обычно приходится допускать малые значения B_l; таким образом допускаемая величина B_l представляет собой некоторую функцию D (фиг. 467).

О причине такой зависимости сказано ниже (§ 242).

§ **240. Влияние** AS **на размеры машин.** Как показывает уравнение (233,3), с возрастанием AS линейные размеры машины уменьшаются. Таким образом является выгодным при проектировании выбирать возможно большие значения AS. Величину AS можно выбирать на основании кривой фиг. 467, где графически представлена зависимость между AS и D, полученная на основании ряда данных уже построенных машин.

Как видно из этой фигуры, AS есть некоторая функция D: при больших D можно брать большие значения AS, и наоборот.

О причинах такой зависимости AS от D сказано ниже (§ 242).

§ **241. Влияние** AS **на коммутацию.** Для выяснения этого влияния обратимся к выражению, дающему величину реактивного напряжения,

$$e_r = 4w \cdot v \cdot l_i \cdot AS \cdot \lambda \cdot 10^{-8} \text{ вольт.}$$

Как видно из этого выражения, большие значения AS влекут за собой затруднения условий коммутации.

Поэтому при больших AS машины должны иметь дополнительные полюса.

§ **242. Влияние** AS **и** s_a **на нагрев машины.** Потери на джоулево тепло в якоре являются некоторой функцией величины AS и увеличиваются с возрастанием последней.

Действительно, потери, вызываемые током I_a в обмотке якоря с сопротивлением R_a, равны

$$W_{ka} = I_a^2 R_a.$$

Подставляя в эту формулу выражение для R_a

$$R_a = \frac{Nl_a(1 + 0{,}004T_a)}{(2a)^2 \cdot 5\,700 \cdot q_a},$$

получим

$$W_{ka} = \frac{I_a^2 N l_a (1 + 0{,}004 T_a)}{(2a)^2 5\,700 q_a}. \qquad (242{,}1)$$

Имея в виду, что

$$\frac{I_a}{q_a} = s_a$$

и

$$I_a N = \pi D A S,$$

выражение (242,1) перепишем так:

$$W_{ka} = \frac{\pi D A S s_a}{5\,700} l_a (1 + 0{,}004 T_a). \qquad (242{,}2)$$

Последнее уравнение (242,2) показывает, что потери меди в обмотке якоря пропорциональны линейной нагрузке якоря AS и плотности тока s_a в проводах:

$$W_{ka} \equiv A S s_a. \qquad (242{,}3)$$

Из (242,3) видно, что при малых линейных нагрузках AS могут быть допущены относительно большие значения s_a и, наоборот, при больших AS плотность тока s_a допускается меньшая.

Согласно Рихтеру[1] для машин с хорошей вентиляцией произведение ASs_a должно быть в следующих пределах:

$$1\,000 < ASs_a < 1\,800.$$

Для тяговых двигателей с форсированной вентиляцией произведение $AS \cdot s_a$ может доходить по величине до 2 200.

Согласно Арнольду и Лакуру[2] при проверке нагревания якоря следует руководствоваться следующей эмпирической формулой:

$$\frac{ASs_a}{1 + 0{,}1 v} < 500 \text{ до } 600,$$

где v — окружная скорость якоря в m/sec.

§ 243. Влияние величины AS **и** B_l **на к. п. д. машины; д а типа машин.** На фиг. 468 изображены две примерных кривых к. п. д.

Кривая I относится к машине, построенной так, что она имеет при нормальной нагрузке большое AS и относительно малое B_l (машина I). Кривая II относится к машине такой же мощности, что и в предыдущем случае, но только с малой величиной AS и относительно большой величиной B_l (машина II).

Из фиг. 468 видно, что кривые I и II пересекаются в точке A; до точки пересечения ординаты кривой I больше соответственных ординат кривой II, правее точки пересечения A кривая II

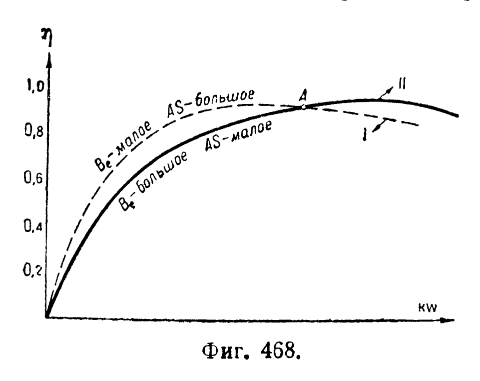
[1] См. Рихтер, Электрические машины.

[2] См. Арнольд-Лакур, Машины постоянного тока.

расположена выше кривой *I*. Такой характер протекания кривых *I* и *II* можно объяснить себе следующим образом:

В машине типа *II* (с малым AS и большим B_l), отличающейся малым сопротивлением обмотки якоря, нагрузочные потери (джоулево тепло в якоре $I_a^2 R_a$) относительно невелики; зато потери холостого хода (гистерезис и токи Фуко) в такой машине относительно велики; поэтому при недогрузках, когда перевешивают по своей величине потери холостого хода, такая машина имеет относительно низкий к. п. д.

Наоборот, в машине типа *I* (с большим AS и малым B_l) нагрузочные потери ($I^2 R_a$) относительно велики, но зато потери холостого хода имеют сравнительно небольшое значение. Поэтому такие машины типа *I* при недогрузках (когда наибольшее влияние на к. п. д. имеет величина потерь холостого хода) имеют лучший к. п. д., чем машины типа *II*.



Фиг. 468.

При перегрузках же, когда наибольшее влияние на коэфициент полезного действия оказывают нагрузочные потери ($I_a^2 R_a$), машины типа *II* (с малым AS и большим B_l) работают экономичнее, чем машины типа *I* (с большим AS и малым B_l). Отсюда следует, что машины типа *II* надо применять тогда, когда есть уверенность, что машина большую часть рабочего времени работает при полной нагрузке. Наоборот, машины типа *I* (с большим AS и малым B_l) выгоднее применять в тех случаях, когда ожидается частая работа с недогрузками.

Обычно современные машины строятся с большим AS и относительно малым B_l, так как машины такого типа получаются, как было указано выше, легче и дешевле. Статистика, кроме того, показывает, что в большинстве случаев машины (особенно двигатели малой и средней мощности) большую часть рабочего времени работают с недогрузкой.

§ 244. Влияние величины диаметра якоря на допускаемые величины B_l и AS. Из уравнения (233,3) следует, что для получения компактных размеров машины следует брать возможно большие величины B_l и AS. Допускаемые значения этих величин B_l и AS являются некоторой функцией диаметра якоря: при больших D можно допускать большие значения AS и B_l, и наоборот.

Один из факторов, влияющих на выбор этих величин B_l и AS, это — форма зубца. При большом диаметре D характеризующее форму зубцов отношение $\frac{z_2}{z_1}$ приближается к единице, что позволяет выбирать большие магнитные насыщения в зубцах и, следовательно, позволяет допускать в воздушном зазоре большие магнитные индукции B_l (фиг. 469).

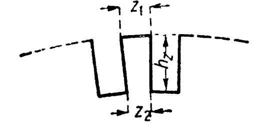
Кроме того, при большом D можно допускать большие глубины паза h_z, не вызывая при этом чрезмерного утонения зубца у основания; таким образом число амперпроводов на 1 пог. cm длины окружности якоря при большом D может быть допущено большое, т. е. в таких машинах может быть допущено большое AS.

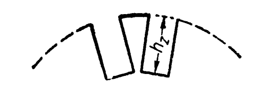
Иллюстрацией сказанного может служить фиг. 467, где даны кривые допускаемых на практике величин B_l и AS в зависимости от диаметра якоря D.

§ 245. Современные тенденции при проектировании машин. В прежнее время, когда еще не нашли широкого распространения дополнительные полюса, для получения хороших условий коммутации обычно строили машины с малой линейной нагрузкой AS в якоре, но с большими магнитными насыщениями и большой величиной магнитной индукции в воздушном зазоре B_l.

Такие машины требовали больших размеров станины и получались поэтому относительно тяжелыми.

В настоящее время существует обратная тенденция: сейчас по преимуществу строят машины с большой линейной нагрузкой в якоре AS, но с относительно умеренной величиной магнитной индукции в воздушном зазоре B_l; при этих условиях, как было выяснено выше, получается экономия в общем весе машины.





Фиг. 469. Чертеж, иллюстрирующий сужение зубца у основания при уменьшении диаметра якоря и при условии сохранения $h_z = \text{const}$.

Затруднения коммутации, связанные с большой величиной AS, в настоящее время преодолеваются путем устройства дополнительных полюсов.

Рекомендуемые значения B_l и AS, приводимые выше, соответствуют современным данным.

§ 246. Выбор величины магнитной индукции в воздушном зазоре B_l при проектировании машины. При проектировании или пересчете машины, величина диаметра D которой нам известна, можно выбирать величину B_l из кривых, приведенных на фиг. 467.

В том случае, если диаметр машины неизвестен, можно при выборе B_l руководствоваться данными нижеследующей таблицы:

Величина магнитной индукции в воздушном зазоре B_l для зубчатых якорей

Малые машины (до 5 ÷ 10 kW)	$B_l = 5\,000 \div 7\,000$
Большие машины	$B_l = 7\,000 \div 11\,000$

В быстроходных машинах (например, турбогенераторах), у которых число циклов перемагничивания железа якоря велико $\left(\frac{pn}{60} > 25\right.$ и выше$\left.\right)$, во избежание чрезмерно высоких потерь рекомендуется брать значение B_l на $30 \div 40\%$ ниже даваемых вышеприведенной таблицей.

§ 247. Выбор величины линейной нагрузки якоря AS. Если диаметр якоря D неизвестен, то при проектировании новой машины можно выбирать величину AS на основании данных нижеследующей таблицы:

Величина линейной нагрузки AS

Малые машины (до $5 \div 10$ kW)	$AS = 150 \div 250$
Большие машины	$AS = 300$ и выше

В том случае, когда диаметр якоря D известен (например, если производится пересчет данной машины на новые условия работы), при выборе AS можно руководствоваться кривыми фиг. 467.

В больших машинах выше 500 kW линейная нагрузка якоря может доходить до $AS = 500$ и выше.

§ 248. Выбор длины якоря l_i. При выборе длины якоря l_i следует иметь в виду условия коммутации. Чем длиннее якорь, тем больше при прочих равных условиях реактивное напряжение, которое, как было выяснено выше, возрастает прямо пропорционально длине якоря.

Поэтому при больших линейных нагрузках AS следует предпочитать машины с малыми осевыми размерами.

При наличности дополнительных полюсов исчезают затруднения коммутации, и конструктор получает большую свободу в выборе l_i

Вообще говоря, с удлинением машины вес ее в известных пределах уменьшается, и стоимость несколько понижается.

Однако при удлиненных якорях возникают некоторые конструктивные затруднения [1], и условия охлаждения делаются несколько хуже.

В зависимости от мощности машины длина якоря l_i обычно колеблется в пределах $10 \div 20 \div 30 \div 40$ cm и выше; в машинах большой мощности и турбогенераторного типа длина якоря может быть значительно больше вышеприведенных величин.

Отношение $\frac{l_i}{b_i}$ обычно в пределах от 0,8 до 1,5, причем, однако, встречаются довольно большие отклонения в ту и другую сторону.

---

[1] Например, при данных якорях приходится брать диаметр вала больше для получения жестких конструкций, что не всегда возможно при малых диаметрах якоря.

Что касается отношения $\frac{l}{\tau}$, то для ориентировки можно пользоваться следующими данными:

$$\text{Рихтер } 0{,}5 \leqslant \frac{l}{\tau} \leqslant 1{,}0;$$

$$\text{Арнольд } \frac{l}{\tau} = 0{,}7 \div 0{,}9;$$

$$\text{Фишер } \frac{l}{\tau} \approx 0{,}7.$$

§ 249. Влияние числа полюсов $2p$ на внешние размеры машины. В начальный период развития электромашиностроения строились по преимуществу машины двухполюсного типа. Это были тяжелые и с большими габаритами машины. С течением времени, однако, стали постепенно приходить к мысли о пользе увеличения числа полюсов, при котором уменьшаются внешние размеры и вес машины. В целесообразности увеличения числа полюсов можно убедиться из следующих соображений.

В уравнение (233,3) число полюсов $2p$ машины не входит, откуда следует, что выбор полюсов $2p$ не влияет, или, лучше сказать, влияет мало, на размеры якоря. Однако внешние размеры машины и ее вес от выбора $2p$ зависят весьма заметным образом.

Для выяснения характера этой зависимости обратимся к уравнению мощности машины:

$$P \approx E_a I_a;$$

подставив отсюда

$$E_a = \frac{pn}{60} \cdot \frac{N}{a} \Phi \, 10^{-8},$$

найдем

$$P = \left(\frac{pn}{60} \cdot \frac{N}{a} \Phi\right) I_a \, 10^{-8}.$$

Имея в виду, что

$$\frac{I_a}{2a} = i_a,$$

перепишем последнее уравнение следующим образом:

$$E_a I_a = 2p \, \Phi \, (N i_a) \frac{n}{60} 10^{-8}.$$

Так как

$$N i_a = \pi D A S,$$

то уравнение мощности получит следующий вид:

$$E_a I_a = (2p \, \Phi)(\pi D A S) \frac{n}{60} 10^{-8}.$$

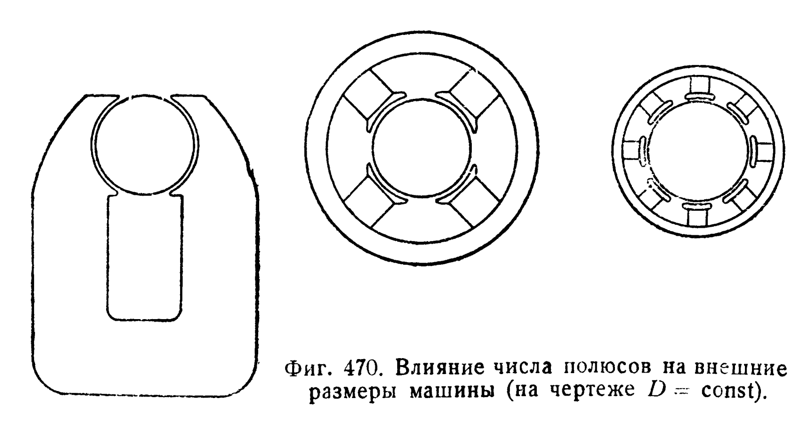
Исследуя последнее уравнение, мы видим, что для данного диаметра D машины и при постоянной величине AS получается следующая зависимость:

$$2p \, \Phi = \text{const}.$$

Последнее уравнение показывает, что при возрастании числа полюсов $2p$ при всех прочих равных условиях величина магнитного потока Ф убывает.

Отсюда следует, что в многополюсных машинах размеры полюсов (их диаметр и длина) получаются, вообще говоря, меньшими, и станина получает также меньшее сечение; последнее обусловлено малой величиной магнитного потока Ф многополюсной машины.

Сказанное поясняет фиг. 470, на которой изображены эскизы электрических машин одной и той же мощности и быстроходности в трех вариантах, при том же диаметре якоря D, но разных числах полюсов $2p$.



Фиг. 470. Влияние числа полюсов на внешние размеры машины (на чертеже D = const).

Сравнивая эти эскизы между собой, мы видим, как заметно уменьшаются внешние размеры машины с возрастанием числа полюсов (при том же диаметре D якоря).

Несмотря на то, что диаметр якоря машины D остается при всех вариантах постоянным, при возрастании $2p$ вес якоря, однако, также несколько уменьшается. Последнее связано с двумя следующими обстоятельствами.

Во-первых, при возрастании $2p$ число щеточных болтов соответственно возрастает; поэтому на каждый щеточный палец приходится меньший ток и на каждый палец может быть посажено меньше щеток; это служит причиной уменьшения осевой длины коллектора.

Во-вторых, при возрастании $2p$ уменьшается соответственно полюсное деление τ и вследствие этого относительная длина неактивных частей обмотки, а именно длина торцевых соединений обмотки делается меньше, как это поясняет фиг. 471.

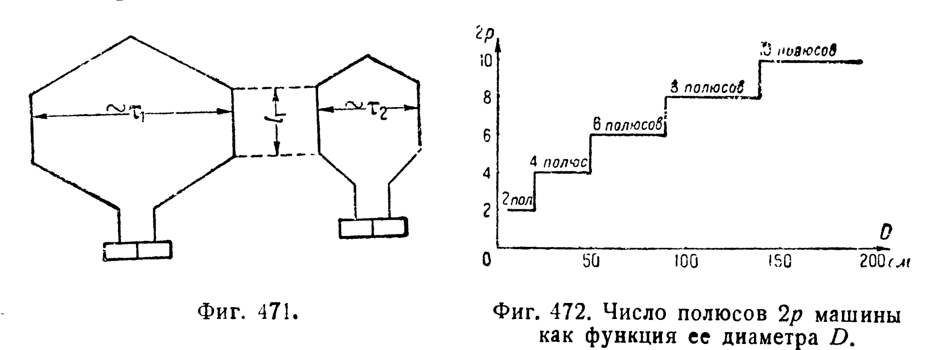
Таким образом при возрастании $2p$ сопротивление обмотки якоря несколько понижается, что должно хорошо сказаться на к. п. д. машины.

Имея в виду все вышесказанное, можно было бы притти к заключению, что, чем больше будет полюсов, тем легче

и дешевле и тем лучше будет электрическая машина. В известных пределах это соображение справедливо, однако чрезмерное увеличение полюсов машины может привести к ряду нежелательных результатов.

Во-первых, при чрезмерном увеличении числа полюсов машины в связи с уменьшением сечения станины мы можем получить зыбкую конструкцию станины, не удовлетворяющую условиям надежности в смысле механической прочности и устойчивости.

Во-вторых, благодаря уменьшению величины полюсного деления и сближению полюсов между собой, коэфициент магнитного рассеяния может увеличиться.



Фиг. 471.

Фиг. 472. Число полюсов $2p$ машины как функция ее диаметра D.

В-третьих, при возрастании $2p$ средняя разность потенциалов между смежными коллекторными пластинами (при том же D) должна вообще увеличиться, благодаря чему может появиться опасность „кругового огня“ на коллекторе (в особенности важно это обстоятельство иметь в виду в высоковольтных машинах).

Наконец, в-четвертых, стоимость фабрикации машины несколько увеличивается соответственно с увеличением числа полюсов.

При проектировании машины число полюсов $2p$ обычно берут тем больше, чем больше диаметр якоря D. При выборе $2p$ можно руководствоваться приводимой здесь кривой, построенной на основании ряда данных существующих и хорошо работающих машин (фиг. 472). Эта кривая дает только ориентировку в выборе числа полюсов $2p$.

В частных случаях возможны отклонения от данных кривой фиг. 472; однако не следует при этом упускать из вида облегчения веса машины при возрастании $2p$.

§ 250. Машинная постоянная. Выше было получено нами основное уравнение

$$\frac{D^2 l_i n}{P} = \frac{6 \cdot 10^{11}}{\alpha_i B_l AS}.$$

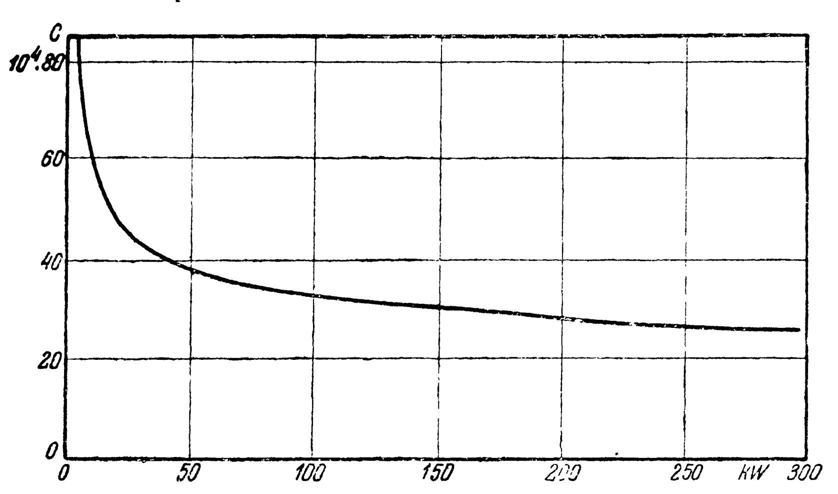
В правую часть этого уравнения входят величины, которые для данного типа машин меняются в сравнительно узких пределах.

Поэтому можно приближенно принять в этом уравнении все выражение, стоящее справа для данного типа машины, величиной приблизительно постоянной:

$$\frac{D^2 l_i n}{P} \approx \text{const} = C.$$

Константу C в дальнейшем мы будем называть „машинной постоянной“, она показывает, насколько хорошо использован материал машины в электрическом AS и магнитном B_l отношении.

Чем меньше машинная постоянная, тем меньше размеры якоря машины при данной мощности и тем, следовательно, лучше использован якорь машины.



Фиг. 473. Машинная постоянная C в функции мощности машины.

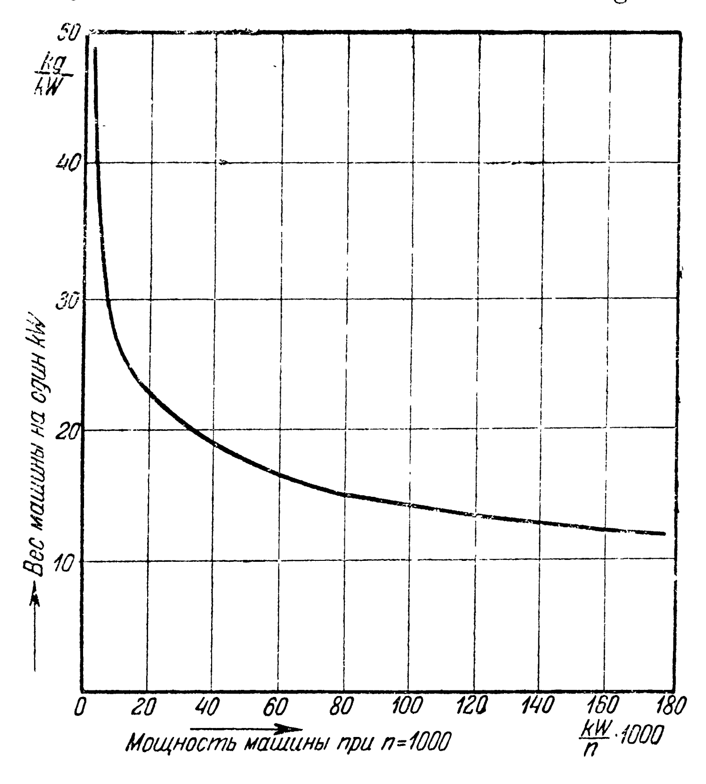
На фиг. 473 дана кривая машинной постоянной, полученная на основании данных ряда хорошо построенных и работающих машин.

Как видно из этой кривой, машинная постоянная **уменьшается** при возрастании мощности машины, т. е. другими словами, эта кривая указывает на то, что **использование материала, идущего на постройку машины, делается все более и более рациональным по мере возрастания мощности машины.** Отсюда следует, что удельная стоимость (т. е. стоимость, отнесенная к 1 kW мощности) большой, многокиловаттной машины — меньше, чем удельная стоимость малой машины.

На фиг. 474 дана зависимость между весом машины в kg' приходящимся на 1 kW мощности (т. е. kg/kW), и мощностью машины, пересчитанной на одно и то же число оборотов, равное 1 000 $\left(\text{т. е. } \frac{1\ \text{kW}}{n} \cdot 1000\right)$.

Из этой кривой видно, что „удельный вес“ машины в kg/kW неуклонно падает по мере возрастания мощности машины.

Так, например, для мощности, равной 10 kW, мы имеем 27 kg веса машины на 1 kW мощности, а при мощности машины в 100 kW „удельный вес“ машины падает до 15 kg на 1 kW.



Фиг. 474.

На фиг. 475 приведена кривая зависимости машинной постоянной C в функции диаметра якоря D.

§ 251. Физический смысл постоянной C; удельное тяговое усилие. Полученное выше основное уравнение

$$\frac{D^2 l_i n}{P} = \frac{6 \cdot 10^{11}}{\alpha_i B_l AS}$$

перепишем в таком виде:

$$\frac{D^2 l_i n}{P} = \frac{6 \cdot 10^{11}}{\varphi}.$$

Величина $\varphi = \alpha_i B_l AS$, входящая в знаменатель вышенаписанного выражения, имеет вполне определенный физический смысл. Постараемся его здесь раскрыть.

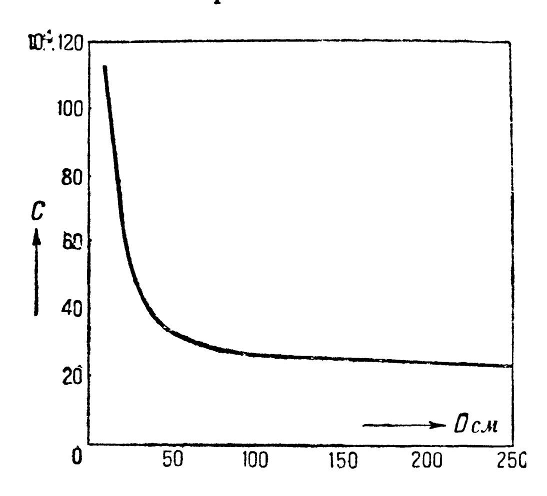
Для этой цели на внешней рабочей поверхности якоря по всей его длине l_i вырежем полоску шириной в 1 cm (фиг. 476). Предположив, что наша машина работает двигателем, найдем

то усилие F, с которым пучок проводов, расположенных на внешней цилиндрической поверхности якоря на протяжении 1 cm части окружности, будет стремиться переместиться в магнитном поле B_l.

Для решения этой задачи применим формулу Био и Савара:

$$F = H \cdot L \cdot I \cdot N, \qquad (251,1)$$

где H — напряжение магнитного поля;
L — длина проводника;
I — ток в амперах;
N — число проводников.



Фиг. 475. Машинная постоянная C в функции диаметра машины D.

Фиг. 476.

В условиях нашего случая мы имеем:

$H = B_{cp}$ — средняя величина магнитной индукции в воздушном зазоре;

$L = l_i$ — „теоретическая" длина проводов;

$I = i_a$ — ток, текущий в проводнике;

$N = z_0$ (число проводов, расположенных на длине в 1 cm окружности якоря).

Имея в виду эти соотношения, уравнение (251,1) перепишем таким образом:

$$F = B_{cp} l_i (i_a z_0). \qquad (251,2)$$

Произведение $i_a z_0$ представляет собой число амперпроводов, приходящееся на 1 cm длины окружности якоря, и равно линейной нагрузке AS; поэтому вышенаписанное уравнение (251,2) получит следующий вид:

$$F = B_{cp} l_i AS.$$

Теперь найдем то усилие φ, с которым будет тянуть 1 cm^2 рабочей поверхности якоря (фиг. 476, нижний чертеж).

Это усилие φ будет меньше, чем F, в отношении l_i, т. е. мы получим

$$\varphi = \frac{F}{l_i} = B_{cp} AS.$$

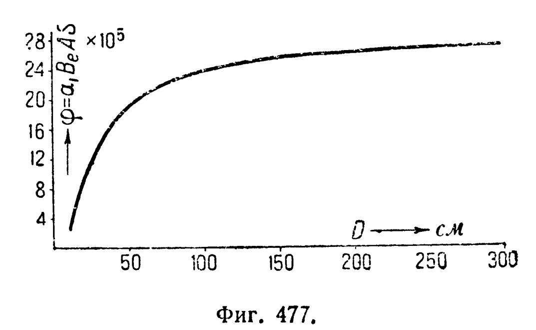
На основании фиг. 462 имеем

$$\frac{B_{cp}}{B_l} = \frac{b_i}{\tau} = \alpha_i;$$

поэтому окончательно найдем

$$\varphi = \alpha_i B_l AS. \tag{251,3}$$

Таким образом мы видим, что знаменатель правой части выражения (233,3) имеет вполне определенный физический смысл: оказывается, что произведение $\alpha_i B_l AS = \varphi$ есть не что иное, как тяговое усилие, приходящееся на 1 cm² рабочей поверхности якоря.



Фиг. 477.

Эту величину можно назвать удельным тяговым усилием.

Удельное тяговое усилие φ характеризует степень использования типа машины: в хорошо использованных типах φ должно быть достаточно велико. На фиг. 477 дана кривая значений φ для хорошо использованных машин, полученная на основании данных Рихтера, который впервые обратил внимание на физический смысл величины φ.

Как показывает фиг. 477, φ растет с увеличением D, другими словами, степень использования рабочей поверхности якоря возрастает с увеличением D.

Причина этого заключается в следующем:

В машинах, имеющих малый диаметр якоря D и небольшие пазы, изоляция паза занимает относительно больше места, чем в машинах с большим D и большими размерами паза.

Кроме того, в машинах малого диаметра D сужение зубца у основания больше, чем в машинах большого диаметра (фиг. 469). Вследствие этого, как было сказано выше, в малых машинах приходится допускать меньшие значения B_l и AS, чем в машинах, имеющих большой диаметр якоря D. Отсюда понятно, что величина удельной тяги, пропорциональная произведению магнитной индукции в воздушном зазоре и линейной нагрузки якоря

$$\varphi = \alpha_i B_l \cdot AS,$$

должна быть меньше для малых машин.

§ 252. Зависимость к. п. д. машины от ее размеров и быстроходности Является известным фактом, что быстроходные машины, вообще говоря, имеют лучший к. п. д., чем тихоходные — на ту же мощность. Известно также то, что к. п. д. η машин большой мощности выше, чем к. п. д. машин малой мощности той же быстроходности.

Причину этого можно объяснить следующим образом:

Выше нами было выведено следующее соотношение, связывающее размеры машины и ее мощность:

$$\frac{D^2 l_i n}{P} = C.$$

Это уравнение показывает, что мощность машины возрастает прямо пропорционально $D^2 l_i n$:

$$P \equiv D^2 l_i n;$$

другими словами, мы можем утверждать, что мощность машины возрастает прямо пропорционально кубу линейных размеров d^3 и прямо пропорционально быстроходности n:

$$P \equiv d^3 \cdot n.$$

Теперь спросим себя, как зависят потери P_{nom} от линейных размеров машины. Можно грубо приближенно принять, что потери P_{nom} зависят только от объема рабочего слоя (фиг. 399); последний же (при достаточно больших машинах, когда $h_z \approx \text{const}$) представляет собой некоторую функцию цилиндрической поверхности якоря.

Таким образом мы можем приближенно сказать, что потери машины возрастают прямо пропорционально второй степени линейных размеров якоря, т. е. что

$$P_{nom} \equiv d^2.$$

Отсюда следует, что процентное значение потерь v машины будет

$$p_{nom} \equiv \frac{P_{nom}}{P} \cdot 100 \equiv \frac{d^2}{d^3 \cdot n} = \frac{1}{d \cdot n}.$$

Таким образом мы приходим к заключению, что процентное значение потерь машины убывает обратно пропорционально приблизительно линейным размерам машины и ее быстроходности.

§ 253. Предельная мощность машины постоянного тока. Выбор AS. Вопрос о той предельной мощности, на которую может быть построена при данной быстроходности электрическая машина постоянного тока, теснейшим образом связан с условиями безыскровой коммутации.

Одним из основных условий, от соблюдения которых зависит безыскровая коммутация машины, является хороший контакт

между щетками и коллектором. Затруднения коммутации, как показывает опыт, возрастают с увеличением окружной скорости машины.

Ввиду этого при расчете для быстроходных машин следует выбирать линейную нагрузку якоря AS вообще меньше, чем для тихоходных машин.

Для машин очень большой мощности согласно данным Треттина, [1] можно линейную нагрузку якоря выбирать на основании следующей эмпирической формулы:

$$AS = 411\,\frac{v_a + 25}{v_a + 10}, \tag{253,1}$$

где v_a — окружная скорость якоря, выраженная в m/sec.

Таким образом, применяя формулу (253,1) для разных значений v_a, получим:

при $v_a = 20$ m/sec . . . . . . $AS = 411 \cdot \frac{20 + 25}{20 + 10} = 607$;

„ $v_a = 30$ „ . . . . . . $AS = 411 \cdot \frac{30 + 25}{30 + 10} = 565$;

„ $v_a = 60$ „ . . . . . . $AS = 411 \cdot \frac{60 + 25}{60 + 10} = 500$.

Связь между мощностью P и линейными размерами в машинах большой мощности. Желая выяснить, как изменяется диаметр машины D с возрастанием мощности P, напишем уравнение

$$P = UI_a. \tag{253,2}$$

Величину напряжения U машины мы можем выразить следующим образом:

$$U = \frac{K}{2p} \cdot e, \tag{253,3}$$

где K — общее число коллекторных пластин на коллекторе;

$2p$ — число полюсов;

e — средняя величина разности потенциалов между двумя смежными коллекторными пластинами.

Кроме того, для параллельной обмотки имеем

$$I_a = 2p \cdot i_a. \tag{253,4}$$

Подставляя (253,3) и (253,4) в (253,2), найдем

$$P = \frac{K}{2p} \cdot e \cdot 2p \cdot i_a = K \cdot e \cdot i_a. \tag{253,5}$$

Принимая во внимание, что

$$Ki_a = \frac{N}{2}\, i_a = \frac{\pi D \cdot AS}{2},$$

---

[1] См. C. Trettin, Ueber die Funkengrenze die Gleichstrommaschinen, Siemens Jahrbuch, 1927.

и подставляя последнее выражение в (253,5), найдем **окончательно**

$$P = \frac{\pi}{2} \cdot e \cdot AS \cdot D. \qquad (253,6)$$

Полученное здесь уравнение (253,6) показывает, что при больших мощностях, когда значения e и AS достигают предельной и в дальнейшем очень мало изменяющейся с возрастанием мощности величины, мощность машины возрастает прямо пропорционально не второй, но первой степени диаметра.

Другое выражение для мощности P электрической машины весьма большой мощности. Окружная скорость машины на периферии якоря будет

$$v_a = \frac{\pi D \cdot n}{60};$$

находя отсюда

$$D = \frac{60 v_a}{\pi n}$$

и подставляя в (253,6), найдем

$$P = \frac{\pi}{2} \cdot e \cdot AS \cdot \frac{60 v_a}{\pi \cdot n} = \frac{30 \cdot AS \cdot e \cdot v_a}{n}.$$

В настоящем уравнении P выражено в W и v_a — в cm/sec; выражая P в kW и v_a — в m/sec, найдем окончательно

$$P = \frac{3 \cdot AS \cdot e \cdot v_a}{n}. \qquad (253,7)$$

Подставляя в выражение (253,7) выражение (253,1) и величину предельно допускаемого значения средней разности потенциалов между смежными коллекторными пластинами $e = 20$ V, найдем

$$P = \frac{3 \cdot e \cdot v_a}{n} \cdot 411 \cdot \frac{v_a + 25}{v_a + 10},$$

или

$$P = \frac{3 \cdot 20 \cdot v_a}{n} \cdot 411 \cdot \frac{v_a + 25}{v_a + 10},$$

откуда

$$P = 24\,800 \frac{v_a}{n} \cdot \frac{25 + v_a}{10 + v_a}, \qquad (253,8)$$

где P выражено в kW и v_a — в m/sec.

Пример. Подставив в формулу (253,8) предельное значение для окружной скорости $v_a = 60$ m/sec, найдем для разных чисел оборотов в минуту n соответственные значения предельных мощностей электрических машин постоянного тока:

при $n = 1\,000$ об/мин . . . . $P = 1\,800$ kW
» $n = 500$ » . . . . $P = 3\,600$ »
» $n = 100$ » . . . . $P = 18\,000$ »

Из этого подсчета видно, что с увеличением мощности машины ее нормальное число оборотов в минуту должно, как общее правило, уменьшаться.

ГЛАВА ДВАДЦАТЬ ДЕВЯТАЯ

РАСЧЕТ ЯКОРЯ И КОЛЛЕКТОРА

§ 254. Основные данные. Приступая к расчету электрических машин, необходимо иметь следующие данные:

мощность машины P (в kW);

напряжение у зажимов U (в V);

число оборотов в минуту n.

Кроме того, необходимо иметь сведения о характере возбуждения (шунтовое, последовательное или смешанное).

Иногда при расчете ставятся еще некоторые дополнительные условия, касающиеся величины падения напряжения, степени перегрузки и др.

§ 255. Выяснение главных размеров машины. Самый важный момент при расчете электрической машины — это установление основных размеров машины: диаметра ее якоря D и длины якоря l_i.

Характер дальнейших расчетных операций по выяснению всех размеров данной машины в значительной мере предопределяется теми значениями D и l_i, которые были выбраны в начале расчета.

При выяснении величин D и l_i обыкновенно исходят из основного уравнения:

$$\frac{D^2 l_i n}{P} = \frac{6 \cdot 10^{11}}{\alpha_i B_l AS} = C. \tag{255,1}$$

Ход расчетных операций при этом обычно бывает следующим:

1. На основании кривой фиг. 473 находим величину машинной постоянной для данной величины мощности в киловаттах.

2. Зная величину C, находим произведение

$$\alpha_i B_l AS = \frac{6 \cdot 10^{11}}{C}. \tag{255,2}$$

3. На основании кривых фиг. 467 устанавливаем величину B_l, AS и на основании § 238 — величину α_i.

4. Из уравнения (255,1) находим величину

$$D^2 l_i = \frac{CP}{n} = A.$$

Мы получим одно уравнение с двумя неизвестными. Для решения его составляем следующую таблицу:

Выбрано	Подсчитано							
l_i	$D = \sqrt{\frac{A}{l_i}}$	$\tau = \frac{\pi D}{2p}$	$\frac{b_i}{\tau} = \alpha_i$	$\frac{l_i}{b_i}$	$v = \frac{\pi D n}{60}$	$2p$	a	$i_a = \frac{I_a}{2a}$

Порядок заполнения этой таблицы может быть следующий:

1. Произвольно задаемся длиной якоря l_i (в пределах $10 \div 40$ cm и выше).

2. Находим величину $D = \sqrt{\frac{A}{l_i}}$.

3. Зная D, задаваясь числом полюсов $2p$, α_i и a, находим остальные величины: τ, b_i, v и i_a.

Вышеуказанный подсчет повторяем для нескольких значений l_i.

Из всех полученных таким образом вариантов нам необходимо при дальнейшем подсчете остановиться на каком-либо одном.

Как видно из вышеизложенного, мы имеем здесь дело с неопределенной задачей, допускающей любое число решений. Из всех этих решений конструктор должен выбрать одно, которое соответствовало бы машине, совершенной с точки зрения ее электрических свойств и конструкции.

Вышеуказанная неопределенность решения при определении главных размеров машины исчезает, если к уравнению (255,1) присоединить еще новое уравнение, характеризующее какое-либо дополнительное условие. Это уравнение мы можем получить, задаваясь при расчете, например, определенной величиной скорости $v = \frac{\pi D n}{60}$ или определенной величиной отношения $\frac{l_i}{b_i}$ и т. п.

§ 256. Суммарная длина якоря. Остановившись окончательно на определенных величинах D и l_i, переходим к детальному выяснению размеров машины.

Прежде всего попытаемся найти действительную (по чертежу) длину якоря l_1. Как видно из фиг. 461, эта длина равна

$$l_1 = l + n_s b_s, \qquad (256,1)$$

где l — суммарная длина всех железных пакетов;

n_s — число вентиляционных каналов и b_s — ширина их.

Сравнивая уравнение (256,1) с (231,1), [1] находим

$$l_1 = l_i + (1 - k) n_s b_s.$$

Полагая $k \approx \frac{2}{3}$, находим

$$l_1 = l_i + \frac{1}{3} n_s b_s.$$

§ 257. Выбор системы обмотки якоря. Установив основные размеры якоря, можем теперь перейти к проектированию обмотки якоря.

В настоящее время применяются почти исключительно только барабанные обмотки.

При проектировании машины необходимо бывает решить вопрос о выборе одного из трех типов получивших распростра-

[1] См. § 231, уравнение (231,1).

нение обмоток: последовательной, последовательно-параллельной или параллельной.

Решающую роль при выборе системы обмотки играет ток i_a в проводах обмотки. С одной стороны, этот ток i_a не должен быть чрезмерно большим (в среднем он не должен превосходить примерно $150 \div 200 \div 250$ A) во избежание массивных проводов большого сечения в якоре, при которых получаются большие потери на токи Фуко в самых проводах.

С другой стороны, нежелательно иметь ток i_a чрезмерно малый, так как при малом i_a приходится применять вместо стержневых обмоток проволочные, при которых коэфициент заполнения паза получается малым и которые отличаются меньшим конструктивным совершенством и меньшей механической крепостью, чем стержневые обмотки.

Таким образом мы видим, что система обмотки якоря должна быть выбрана такой, при которой получается подходящее сечение для проводов обмотки.

Предположим для примера, что нам необходимо рассчитать обмотку якоря восьмиполюсной машины на 240 kW и 4 0 A. Если принять в якоре последовательную обмотку ($a = 1$), то получится ток в каждом проводе

$$i_a = \frac{400}{2a} = \frac{400}{2} = 200 \text{ A}.$$

Эта величина слишком велика, поэтому попытаемся выяснить, не будет ли годиться при данных условиях параллельная обмотка ($a = p$); найдем

$$i_a = \frac{400}{2p} = \frac{400}{8} = 50 \text{ A}.$$

При таком малом токе i_a придется применить соответственно провода малого сечения, что дает маложесткую обмотку для такой машины.

Таким образом у нас остается третий путь: применение последовательно-параллельной обмотки с числом параллельных ветвей $2a = 4$; для этого случая найдем

$$i_a = \frac{400}{2a} = \frac{400}{4} = 100 \text{ A},$$

что является подходящей величиной.

§ 258. Число проводов обмотки якоря (предварительная величина). Зная величину диаметра якоря D и зная величину AS (которой мы раньше задались), можем найти общее число ампер-проводов на всей окружности якоря:

$$\pi DAS.$$

Обозначив i_a ток, текущий в каждом проводе обмотки якоря, найдем общее число проводников якоря

$$N = \frac{\pi DAS}{i_a}. \qquad (258,1)$$

Число N из формулы (258,1) получается приближенно в круглых цифрах; в дальнейшем это число придется несколько изменить в ту или другую сторону с таким расчетом, чтобы все провода обмотки можно было заложить в пазы и чтобы были соблюдены все обмоточные формулы.

Величину тока i_a, входящего в выражение (258,1), найдем из следующего уравнения:

$$i_a = \frac{I \pm i_n}{2a},$$

где знак + берется при работе машины в качестве генератора и знак — берется при работе ее в качестве двигателя.

В начале расчета величина тока возбуждения i_n нам обычно еще неизвестна; поэтому предварительно приходится приближенно задаться его величиной; при этом можно руководствоваться данными приводимой таблицы. Чем окружная скорость якоря больше, тем лучше охлаждается якорь и тем большую можно допускать плотность тока в проводах якоря.

По Треттину плотность тока в проводах якоря можно выбирать на основании фиг. 478. Как видно из этой фигуры, плотность тока в якоре может колебаться в среднем в пределах 3—6 A/mm².

На этой же фигуре даны ориентировочные указания относительно выбора высоты стержней h обмотки якоря. Как видно из фиг. 478, высоту стержня h приходится брать меньше при больших окружных скоростях во избежание чрезмерного возрастания потерь на токи Фуко в меди обмотки якоря.

Фиг. 478.

Таблица 1

Мощность машины в kW	Ток возбуждения в % от нормального тока якоря
10	5
20	4
40	3
60	2,5
100	2,0
300	1,5
1 000	1,2

§ 259. Сечение проводов обмотки якоря. Сечения провода обмотки якоря можно найти из формулы

$$q_a = \frac{i_a}{s_a},$$

где i_a — ток в проводе и q_a — сечение провода в mm².

В этой формуле мы должны задаться плотностью тока s_a:

Допускаемая плотность тока s_a уменьшается при возрастании i_a (а следовательно, и при возрастании сечения q_a).

Последнее объясняется тем известным обстоятельством, что с возрастанием сечения отношение внешней охлаждающей поверхности провода к его сечению уменьшается, и отдача проводом тепла в окружающую среду с увеличением сечения делается все более и более затруднительной.

§ 260. Диаметр коллектора. Число коллекторных пластин (предварительная величина) находится из формулы

$$K=\frac{N}{2w}, \tag{260,1}$$

где w — число витков одной секции.

В случае стержневой обмотки (когда $w=1$) получаем

$$K=\frac{N}{2}.$$

Толщина изоляции β_i берется обычно разная в зависимости от величины напряжения машины.

При $U \leq 250$ V можно будет брать $\beta_i = 0{,}05 \div 0{,}08$ cm и при $U > 250$ V $\beta_i = 0{,}08 \div 0{,}12$ cm.

Фиг. 479. Коллекторное деление.

Ширина коллекторных пластин колеблется обычно в пределах

$$\beta_k = 0{,}3 \div 0{,}5 \div 1{,}0 \text{ cm}.$$

Зная величину коллекторного деления (фиг. 479)

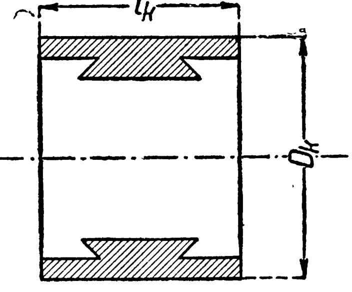
$$\beta=\beta_k+\beta_i,$$

можем найти диаметр коллектора (479)

$$D_k=\frac{K\beta}{\pi}. \tag{260,2}$$

Диаметр коллектора необходимо выбирать с таким расчетом, чтобы окружная скорость на коллекторе не превосходила примерно 35 m/sec, т. е.

$$v_k=\frac{\pi D_k n}{60} \leq 35 \text{ m/sec}.$$



Фиг. 480. Размеры коллектора.

§ 261. Щетки. В настоящее время применяются почти исключительно угольные щетки. В редких случаях при низком напряжении машины (например, для электролитических целей) применяются иногда также медные щетки.

Ширина щеток для машин средней мощности колеблется в пределах $10 \div 25$ mm и составляет в среднем величину, равную $2 \div 3$ коллекторным делениям.

Остальные размеры щетки должны быть по возможности малы, для того чтобы масса щетки была невелика.[1]

[1] Для того чтобы щетка при вращении коллектора работала спокойно и не вибрировала, необходимо, чтобы пружина достаточно сильно прижимала щетку к коллектору и чтобы масса щетки была невелика.

Длина щетки в машинах средней мощности колеблется в пределах $10 \div 30$ mm.

В трамвайных двигателях приходится применять относительно длинные щетки (с длиной до 50 mm), так как при этом получается более солидная и надежная конструкция щеткодержателя.

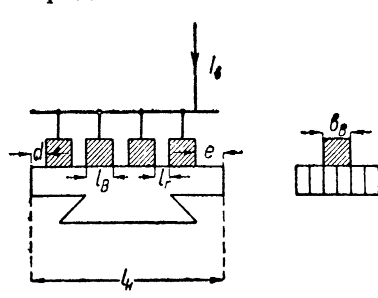
§ 262. Длина коллектора. Длину коллектора l_k можно рассчитать, зная площадь контакта щеток F_b; последнюю величину можно найти, задаваясь плотностью тока в контакте щеток:

$$F_b = \frac{I_b}{S_b},$$

где I_b — ток, притекающий к щеточному болту, S_b — плотность тока, которая обычно колеблется в пределах 4—8 A/cm².

Ширина щеток на коллекторе (фиг. 481) колеблется обычно в пределах

$$b_B = 10 \div 15 \div 20 \text{ mm}.$$



Фиг. 481. Выяснение аксиальных размеров коллектора.

Длина щеток (разрез в осевом направлении коллектора) обычно бывает

$$l_B = 15 \div 20 \div 30 \text{ mm}.$$

Зная размеры каждой щетки и число щеток g, сидящих на общем щеточном пальце, можно найти длину коллектора l_k:

$$l_k = g l_B + (g - 1) l_r + d + e,$$

где g — число щеток, l_r — осевое расстояние между смежными щетками, e и d — осевое расстояние между краями коллектора и ближайшими щетками (фиг. 481).

Обычно бывает

$$l_r = 0{,}2 \div 0{,}5 \text{ cm}; \quad e \approx d = 0{,}5 \div 10 \text{ cm}.$$

§ 263. Разность потенциалов между смежными коллекторными пластинами. При проектировании коллектора необходимо иметь представление о величине разности потенциалов между смежными коллекторными пластинами, влияющей на размеры коллектора.

Средняя величина разности потенциалов между смежными коллекторными пластинами e_{cp} может быть найдена следующим образом:

Разность потенциалов между двумя ближайшими разноименными щетками равна U; между этими щетками находится $\frac{K}{2p}$ коллекторных пластин.

Таким образом средняя разность потенциалов будет

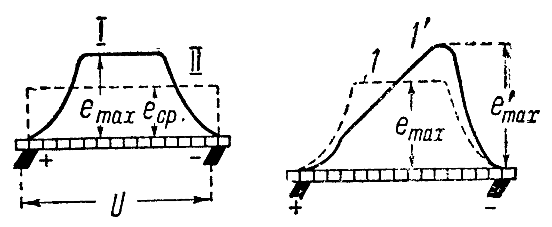
$$e_{cp} = \frac{U}{\frac{K}{2p}} = \frac{U2p}{K}. \qquad (263{,}1)$$

Изучая полученное нами соотношение, мы видим, что e_{cp} возрастает с увеличением напряжения машины U и с увеличением числа полюсов $2p$. Это — одна из причин, дающая объяснение тому факту, что машины высокого напряжения обычно строятся с меньшим числом полюсов, чем машины низкого напряжения той же мощности.

Разность потенциалов между смежными пластинами представляет собой переменную величину; наибольшего значения она достигает между теми коллекторными пластинами, которые в данный момент времени находятся по середине между двумя разноименными щетками; наименьшая величина e получается в тех местах коллектора, где расположены щетки.

На фиг. 482 показана кривая разности потенциалов между смежными пластинами I при холостом ходе машины и кривая II средней величины e_{cp} по окружности коллектора.

Мы видим, что кривая I достигает своего максимального значения приблизительно по середине на коллекторе между двумя разноименными щетками.



Фиг. 482. Кривые изменения разности потенциалов между смежными коллекторными пластинами при холостом ходе I и при нагрузке I'.

При ширине секции обмотки якоря, приблизительно равной полюсному делению τ, в каждой из таких секций будет при вращении якоря наводиться э. д. с., форма кривой которой будет сходна с формой кривой B_l.

Поэтому кривая I (фиг. 482) по своей форме будет похожа на кривую изменения магнитной индукции B_l вдоль воздушного зазора (фиг. 462). Предполагая, что кривая I (фиг. 482) имеет некоторое (правда, отдаленное) сходство с синусоидой, найдем грубо приближенно

$$e_{max} = \frac{\pi}{2} e_{cp} = \frac{\pi}{2} \cdot \frac{U2p}{K} = \frac{\pi p U}{K}. \qquad (263,2)$$

При нагрузке машины и коротких замыканиях кривая B_l деформируется благодаря действию реакции якоря. В соответствии с этим мы получаем вместо прежней кривой I новую I', и в результате максимальная величина разности потенциалов между смежными коллекторными пластинами повышается до величины e_{max}'. При больших перегрузках и коротких замыканиях может иногда получиться $e_{max}' > 1{,}4\ e_{max}$ и выше.

Наибольшая допускаемая величина e_{max}' лежит в пределах $40 \div 50$ V для машин малой мощности и $25 \div 30$ V для машин большой мощности. [1]

---

[1] См. Рихтер, Электрические машины, т. I.

Таким образом допускаемые значения средней величины разности потенциалов согласно уравнению (263,2)

$$e_{cp} = \frac{2}{\pi} e_{\max} = \frac{2}{\pi}\left(\frac{e_{\max}'}{1,5}\right) = \frac{1,33}{\pi} e_{\max}'$$

колеблются в следующих пределах:

$$e_{cp} = \frac{1,33}{\pi}(40 \div 50) \approx 17 \div 21 \text{ V (для малых машин)}$$

и

$$e_{cp} = \frac{1,33}{\pi}(25 \div 30) \approx 11 \div 13 \text{ V (для больших машин).}$$

Для машин, имеющих компенсационную обмотку, при которой исключена возможность деформации потенциальной кривой на коллекторе, приведенные выше допускаемые значения e_{cp} могут быть увеличены на 50%.

ГЛАВА ТРИДЦАТАЯ

ВЫЯСНЕНИЕ РАЗМЕРОВ ЗУБЦОВ И СЕРДЕЧНИКА ЯКОРЯ

§ 264. **Число пазов**. Зная число проводов N обмотки якоря, можем теперь перейти к решению вопроса о размещении проводов этой обмотки в пазах якоря. Число пазов, проштампованных по всей окружности якоря, найдем из следующего уравнения:

$$Z = \frac{N}{u_n}, \qquad (264,1)$$

где N — общее число проводов обмотки якоря, u_n — число проводов, заложенное в один паз.

Зная Z, можем найти величину зубцового деления

$$t_1 = \frac{\pi D}{Z}. \qquad (264,2)$$

При малом числе пазов на пару полюсов ухудшаются условия коммутации, увеличиваются пульсационные потери в полюсных наконечниках и могут возникнуть звуковые колебания (гудение).

В среднем можно выбирать

$$\frac{Z}{2p} = 11 \div 15 \text{ пазов.}$$

В малых машинах эта величина может иногда опускаться до

$$\frac{Z}{2p} = 6 \div 7 \text{ пазов.}$$

Арнольд рекомендует избегать по возможности четного числа

пазов на пару полюсов (на основании соображений, уже высказанных раньше).

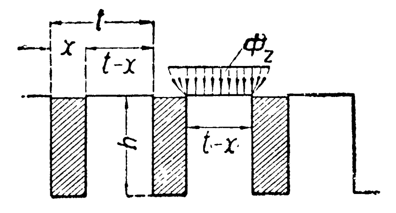
§ 265. Наивыгоднейшая ширина паза. При проектировании машины мы можем в различных вариантах выбирать различной формы пазы, например, низкие и широкие или узкие, но глубокие.

Возникает вопрос, какова должна быть форма паза, при которой получается наилучшее использование типа машины, т. е. другими словами, возникает задача о наивыгоднейшей ширине паза.

Попытаемся решить эту задачу. Для этой цели напишем уравнение мощности

$$P = E \cdot I$$

и преобразуем его таким образом, чтобы в него вошли величины, характеризующие размеры пазов и зубцов.



Фиг. 483. Зубцы и пазы.

Предположим приближенно, что коэфициент заполнения паза равен единице, и предположим, что в каждом пазу машины находится только один массивный медный провод, целиком заполняющий паз (фиг 483).

Сечение паза будет $h \cdot x$.

Обозначив через s_a плотность тока в массивном проводе, найдем ток I, текущий в нем:

$$I = (h \cdot x) s_a.$$

Теперь найдем величину потока Φ_z, проходящего через один зубец; на основании фиг. 483 имеем

$$\Phi_z \equiv B_z (t - x),$$

где B_z — магнитная индукция в зубце.

Величина э. д. с. машины E пропорциональна величине всего потока и, следовательно, пропорциональна потоку Φ_z.

$$E \equiv \Phi_z \equiv B_z (t - x).$$

На основании изложенного имеем

$$P = E \cdot I \equiv (t - x) \; B_z (h \cdot x) \, s_a.$$

Нашей задачей является отыскание такой величины x, при которой произведение EI получает наибольшее значение.

Для данного диаметра якоря и типа машины глубина паза h и магнитная индукция B_z, как было выяснено выше, представляет собой величину более или менее постоянную. Поэтому вышеуказанная задача отыскания условий, при которых $P = \max$,

сводится к отысканию того значения x, при котором произведение

$$(t - x)\,x = \max.$$

Нетрудно доказать что последнее произведение получает максимальное значение при $x = \frac{t}{2}$.

Отсюда следует, что наилучшее использование типа получается, когда ширина паза приблизительно равна половине зубцового деления.

На практике приходится несколько отступать от этого правила, делая ширину паза иногда немного больше средней ширины зубца ввиду необходимости оставления достаточного места для изоляции паза и проводов.

§ 266. Глубина паза. Чем глубже паз, тем больше (при данной его ширине) может быть заложено в него проводов и тем больше, следовательно, может быть использован тип данной машины.

Предельная величина глубины паза зависит от диаметра якоря D, возрастая с увеличением последнего.

Величину h_z можно выбирать в зависимости от D на основании кривой фиг. 467. При выборе величины h_z нельзя упускать из виду, что глубокие пазы способствуют ухудшению коммутации (при отсутствии дополнительных полюсов).

§ 267. Влияние величины диаметра якоря на глубину паза. Как было сказано в предыдущем параграфе, глубина паза h_z обычно берется больше в машинах, имеющих больший диаметр якоря D (кривые фиг. 467); h_z представляет, таким образом, собой некоторую функцию D.

Попытаемся найти вид этой функции $h_z = f(D)$; для этой цели обратимся к фиг. 484, где изображен якорь машины. Обозначим отношение

$$\frac{t_1}{t_2} = m.$$

Последнее можно переписать еще так:

$$\frac{t_1}{t_2} = m = \frac{D}{D_1} = \frac{D}{D - 2h_z}.$$

Из этого уравнения найдем величину h_z:

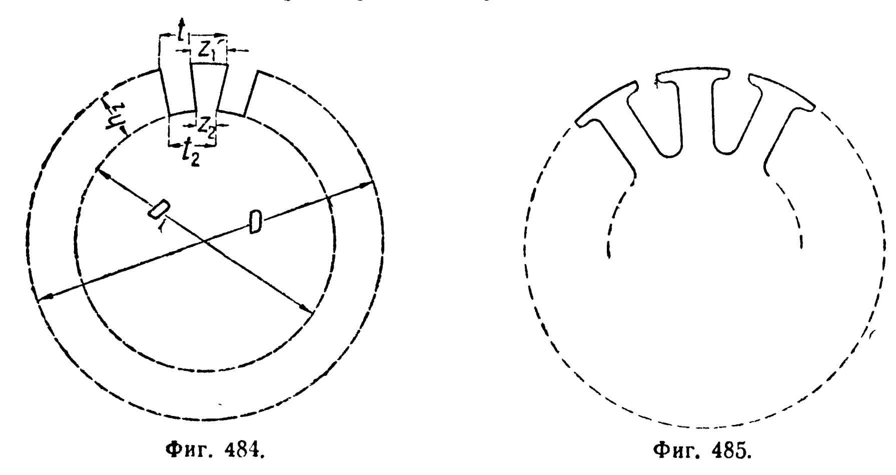
$$h_z = \frac{D}{2}\left(1 - \frac{1}{m}\right). \qquad (267,1)$$

Последнее уравнение показывает, что глубина паза h_z представляет собой некоторую функцию диаметра якоря D и возрастает с увеличением D.

На первый взгляд, на основании уравнения (267,1) может показаться, что зависимость $h_z = f(D)$ линейная; на самом деле это не так, ибо величина m, входящая в уравнение (267,1), также меняется с изменением D. На фиг. 467 графически показана зависимость $h_z = f(D)$, полученная на основании конструктивных данных ряда построенных машин.

Как видно из фиг. 467, кривая $h_z = f(D)$ по своему характеру напоминает кривую $AS = f_1(D)$.

Сходство этих кривых не должно нас удивлять, так как линейная нагрузка якоря AS представляет собой некоторую функцию глубины паза h_z, возрастая с увеличением последнего.



Фиг. 484. Фиг. 485.

При малых D иногда применяются якори конструкции фиг. 485, при которой зубцы имеют по всей высоте одинаковую толщину. При такой конструкции можно получить вместительные пазы даже при малых диаметрах якоря.

§ 268. **„Объем тока" в пазу.** При выборе числа проводов в пазу u_n следует иметь в виду величину так называемого „объема тока" I_n, равного по величине произведению из тока в каждом проводе i_a на число их u_n, т. е. $I_n = i_a u_n$. Чем больше объем тока I_n, тем больше получается реактивное напряжение (при той же скорости) и тем больше затруднения коммутации. В машинах средней мощности (100 ÷ 150 kW) не рекомендуется допускать I_n больше 700 ÷ 800.

Для больших машин „объем тока" может быть больше, достигая иногда цифры 1600 ÷ 1800, что является, повидимому, величиной близкой к предельной.

§ 269 **Расчет зубцов.** Необходимо иметь в виду следующие три условия, соблюдение которых должно иметь место при проектировании пазов и зубцов якоря:

1. В пазы должна поместиться вся обмотка якоря, причем должно быть предусмотрено место для изоляции пазов.

2. Максимальная индукция у основания зубца не должна превосходить некоторого допускаемого предела.

3. Глубина паза не должна быть чрезмерно большая во избежание ухудшения коммутации.

Как было сказано в предыдущем параграфе, задаваясь числом проводов в одном пазу u_n, мы можем найти

$$Z = \frac{N}{u_n}$$

и

$$t_1 = \frac{\pi D}{Z}.$$

Теперь нам надлежит выяснить детальные размеры зубца и паза.

Для этой цели, задаваясь максимальной величиной магнитной индукции $B_{zi\,max}$, находим минимальную допускаемую при данных условиях ширину зубца:

$$z_2 = \frac{t_1 B_l l_i}{k_2 B_{zi\,max} l}. \qquad (269,1)$$

В этой формуле k_2 (коэфициент изоляции) может быть принят около 0,9.

Величиной $B_{zi\,max}$ необходимо в формуле (269,1) предварительно задаться.

$B_{zi\,max}$ колеблется обычно в пределах 19000—22000 Gs.

Верхний предел, выше которого не рекомендуется переходить:

$$B_{zi\,max} < 23\,000.$$

Большие значения магнитной индукции в зубцах обычно избегаются, так как при этих условиях чрезмерно повышаются ампервитки, потребные для проведения магнитного потока через зубцы.

Кроме того, при больших магнитных индукциях в зубцах получаются также большими потери железа машины.

Величину $B_{zi\,max}$ можно выбирать на основании следующей эмпирической формулы Оссанны:

$$B_{zi\,max} = \frac{22\,000 \div 25\,000}{1 + 0{,}007 f},$$

где f — число циклов перемагничивания в секунду.

В тех случаях, когда требуется придать машине возможно малые размеры (например, в случае трамвайных двигателей), приходится допускать еще большие величины магнитной индукции, чем вышеприведенные, и доходить иногда до

$$B_{zi\,max} \leqslant 28\,000.$$

§ 270. Высота сердечника якоря. После расчета зубцов переходим к определению размеров сердечника якоря.

Магнитный поток, выходя из полюса и вступая в сердечник якоря, разветвляется затем на две равные части $\frac{\Phi}{2}$ и устанавливает в сердечнике якоря индукцию B_a.

Таким образом мы имеем

$$\frac{\Phi}{2} = B_a l h k_2,$$

где l — длина железа якоря, h — радиальная высота сердечника

якоря и k_2 — коэфициент, учитывающий толщину изоляции (бумажную или лаковую) между железными листами.

Отсюда находим размер h:

$$h = \frac{\Phi}{2B_a l k_2}. \qquad (270,1)$$

Величину магнитной индукции B_a обычно выбирают тем меньше, чем больше бывает число циклов перемагничивания якоря f (во избежание чрезмерных потерь железа).

B_a можно брать на основании следующей таблицы:

$f = \frac{pn}{60}$	B_a
5	16 000
20	12 000
30	10 000
60	8 000
100	5 000

Из этой таблицы видно, что в быстроходных машинах, где можно допускать лишь малые насыщения, приходится брать большое h. В тихоходных же машинах сечение железа может быть взято значительно меньшим и соответственно этому h получает меньшие размеры.

ГЛАВА ТРИДЦАТЬ ПЕРВАЯ

ПОЛЮСА И СЕРДЕЧНИКИ

§ 271. Выбор величины воздушного промежутка δ. При проектировании новой машины конструктору приходится решать важный вопрос о величине воздушного промежутка δ.

При малом воздушном промежутке ампервитки возбуждения получаются относительно малыми. Зато при малом δ магнитное поле машины при колебании нагрузки меняется по своей величине в широких пределах, что скверно отзывается на коммутации и приводит к неустойчивой работе машины. Кроме того, при малом δ получаются относительно большими потери на токи Фуко в полюсных башмаках.

Критерием для выбора величины воздушного промежутка δ может служить степень деформации магнитного поля в воздушном промежутке при нагрузке машины.

Как было выяснено выше, в результате искажающего действия поля реакции якоря под одним краем полюса происходит ослабление поля, а под другим — усиление.

Эта деформация поля вредна в двух отношениях:

1. Вследствие увеличения насыщения под одним из краев полюса происходит увеличение потерь на гистерезис и токи Фуко в зубцах якоря.

2. Вследствие уменьшения и колебания величины магнитной индукции под другим краем полюса ухудшаются условия коммутации машины (в случае отсутствия дополнительных полюсов).

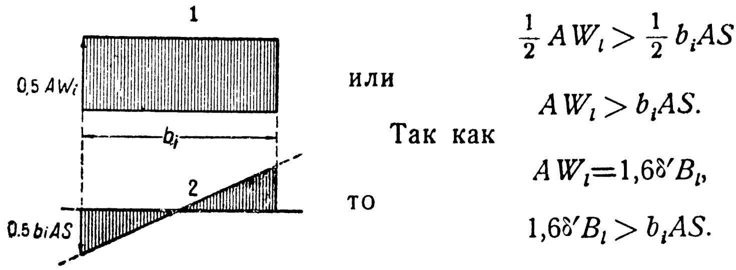
На фиг. 486 показана кривая м. д. с. *1*, создаваемой главными полюсами, и кривая м. д. с. *2* реакции якоря. Мы видим, что под

левым коммутирующим краем полюса действует разность м. д. с.:

$$\frac{1}{2}AW_l - \frac{1}{2}b_iAS.$$ [1]

Величину воздушного зазора δ можно найти, исходя из того условия, чтобы магнитное поле под коммутирующим краем полюса не было равно нулю.

Это требование приводит к следующему неравенству:



Фиг. 486.

$$\frac{1}{2}AW_l > \frac{1}{2}b_iAS$$

или

$$AW_l > b_iAS.$$

Так как

$$AW_l = 1{,}6\delta' B_l,$$

то

$$1{,}6\delta' B_l > b_iAS.$$

Выставляя требование, чтобы м. д. с. полюса под коммутирующим краем была больше м. д. с. реакции якоря примерно на 20%, получим следующее равенство:

$$1{,}6\,\delta B_l = 1{,}2\, b_iAS.$$

Отсюда

$$\delta' = \frac{1.2\, b_iAS}{1{,}6B_l}.$$

Полагая приближенно $\delta' \approx 1{,}2\delta$, $b_i \approx 0{,}7\ \tau$, найдем

$$\delta = 0{,}5\frac{\tau AS}{B_l}. \qquad (271{,}1)$$

На основании этой формулы (271,1) рекомендуется выбирать величину воздушного промежутка в том случае, если машина имеет дополнительные полюса.

При отсутствии дополнительных полюсов рекомендуется [2] величину воздушного промежутка брать больше, находя его по формуле

$$\delta = 0{,}65\frac{\tau AS}{B_l}. \qquad (271{,}2)$$

§ 272. Длина дуги полюсного наконечника *b*. Расчетная длина полюсной дуги будет

$$b_i = \alpha_i\tau.$$

Применяя эмпирическую формулу, найдем

$$b_i \approx b + 2\delta;$$

---

[1] В этом выражении величина м. д. с., создаваемой главными полюсами, нами принята приближенно равной числу воздушных ампервитков AW_l. Принимая эту величину, мы пренебрегаем магнитным сопротивлением в сердечниках магнитов, станине и якоре.

[2] См. R. Richter, Gleichstrommaschinen.

отсюда

$$b \approx b_t - 2\delta. \qquad (272,1)$$

§ 273. Осевая длина полюсного наконечника l_p. Осевую длину полюсного наконечника l_p (фиг. 461) часто берут равной длине якоря l_1.

Однако в последнее время иногда предпочитают делать l_p короче на $5 \div 10$ mm, чем l_1.

Делается это с целью предотвратить захождение силовых линий из полюсов машины в якорь сбоку, через крайние нажимные железные листы (фиг. 461); последние обычно бывают относительно большой толщины, и потому при вращении якоря в них могут наводиться большие вихревые токи.

§ 274 Высота сердечников электромагнитов; предварительный расчет размеров катушек возбуждения. Точно выяснить размеры полюсных сердечников можно только после того, как будут известны размеры катушек возбуждения, сидящих на этих полюсах. Для выяснения же размеров катушек возбуждения необходимо знать общее число ампервиток $AW_в$, потребное для проведения магнитного потока возбуждения Ф через всю магнитную цепь.

Однако величину $AW_в$ мы можем более или менее точно найти только в том случае, когда будут известны все размеры машины (включая сюда и размеры полюсных сердечников).

Таким образом мы попадаем в затруднение, из которого имеется один выход: необходимо предварительно грубо приближенно найти высоту полюсного сердечника h_m; зная h_m, мы сможем уже более или менее точно найти $AW_в$ и затем можем найти уже с большей точностью величину h_m.

Попытаемся найти приближенно высоту катушки возбуждения $h_в$. Для этой цели предположим сначала, что катушка возбуждения на полюсе состоит всего лишь из одного массивного витка сечением $\frac{Q_в}{2}$.

Сечение этого массивного витка найдем, задаваясь величиной плотности тока в проводе $s_в$ в амперах на 1 mm²:

$$Q_в = \frac{AW_k}{s_в} \text{ mm}^2;$$

здесь AW_k — число ампервитков, приходящихся на пару полюсов

На самом деле, обмотка полюса состоит не из одного витка а из многих витков, соединенных последовательно.

Поэтому в расчет придется ввести „коэфициент“ заполнения $f_в < 1$, учитывающий влияние изоляции и воздушных прослоек между витками на размеры катушки.

Таким образом сечение катушек возбуждения, приходящееся на пару полюсов, будет

$$Q_в = \frac{AW_k}{s_в f_в} \text{ mm}^2 = \frac{AW_k}{100\, s_в f_в} \text{ cm}^2.$$

Мы нашли, таким образом, сечение катушки возбуждения. Этим, однако, еще мы не получили полного решения задачи: мы знаем только площадь сечения, но не знаем еще ни высоты катушки $h_в$, ни ее ширины $b_в$ и не знаем еще высоты полюса h_m.

Чем больше будет выбрана нами ширина $b_в$, тем меньше получится высота $h_в$ шпули, а вместе с тем — и высота всего полюса h_t. Однако при этом уменьшится излучающая поверхность шпули, и нагрев ее возрастет.

Толщина катушки возбуждения $b_в$ не должна превосходить некоторой величины для того, чтобы охлаждение такой катушки совершалось достаточно интенсивно. Обычно при проектировании обмотки электромагнитов стараются, чтобы толщина $b_в$ не превосходила примерно 6 cm.

Задаваясь величиной $b_в \leq 6$ cm, найдем сечение одной шпули

$$\frac{Q_в}{2} = h_в b_в = \frac{AW_k}{2 \cdot 100\, s_в f_в} = h_в 6,$$

откуда

$$h_в = \frac{AW_k}{1\,200\, s_в f_в}. \qquad (274,1)$$

Полученное выражение дает возможность приблизительного подсчета $h_в$, если известны все величины, входящие в правую часть этого выражения. Величинами $s_в$ и $f_в$ мы должны задаться.

Коэфициент заполнения $f_в$ зависит от размеров и формы сечения проводов обмотки электромагнитов.

При ленточной обмотке, гнутой на высокое ребро (употребляется при больших машинах), коэфициент заполнения может быть принят в среднем

$$f_в = 0,7 \div 0,8.$$

Коэфициент заполнения для проволочной обмотки будет равен

$$f_в = \frac{\frac{\pi d^2}{4}}{d_1^2} = \frac{\pi}{4}\left(\frac{d}{d_1}\right)^2,$$

где d — диаметр голой проволоки, d_1 — диаметр изолированной проволоки.

При расчетах можно пользоваться данными следующей таблицы, дающей значения $f_в$ для проволоки разных диаметров d в mm.

Таблица значений коэфициента $f_в$

$d =$	0,5	1,0	2,0	3,0	4,0	5,0
$d_1 =$	0,8	1,4	2,4	3,5	4,5	5,5
$f_в =$	0,30	0,40	0,55	0,58	0,62	0,65

Величиной AW_k, находящейся в числителе выражения (274,1) и представляющей собой число ампервитков возбуждения, приходящихся на пару полюсов, мы можем предварительно задаться в пределах

$$AW_k = (1{,}5 \div 2{,}0)\,\tau AS. \qquad (274{,}2)$$

Высотой полюсных сердечников h_m можно предварительно задаться, также пользуясь некоторыми эмпирическими формулами.

Например, по Арнольду можно брать $h_m = (0{,}8 \div 0{,}9)\, D_m$, где D_m — диаметр сердечника.

Автор настоящей книги пользуется часто своей эмпирической формулой, приводящей к хорошим результатам:

$$h_m = \frac{\tau \cdot AS}{600 \div 700}. \qquad (274{,}3)$$

§ 275. Сечение сердечников электромагнитов и ярма. Найдя по одной из приводимых выше формул коэфициент рассеяния, мы можем найти поток Φ_m в сердечнике магнитов:

$$\Phi_m = \sigma \Phi_a,$$

где Φ_a — поток, заходящий из полюсного сердечника в железо якоря.

Зная величину Φ_m, найдем Q_m сердечника:

$$Q_m = \frac{\Phi_m}{B_m}, \qquad (275{,}1)$$

где B_m — магнитная индукция в сердечнике.

Сечение ярма. Поток Φ_m, заходя в ярмо, разветвляется в нем на две равные части $\frac{\Phi_m}{2}$; задаваясь магнитной индукцией в ярме B_i, найдем сечение ярма

$$Q_j = \frac{\Phi_m}{2B_j}.$$

§ 276. Выбор величин B_m и B_j. Обычно выбирают по возможности большие значения магнитных индукций в сердечниках электромагнитов B_m и в станине B_j. При большом B_m сечение сердечника получается малым, благодаря чему получается небольшой средняя длина витков катушек электромагнитов.

При больших магнитных насыщениях в полюсах и станине их сечения получаются относительно небольшими, что приводит к уменьшению их веса.

Кроме того, при больших относительно магнитных индукциях B_m и B_j нормальная работа машины лежит за „коленом“ — в насыщенной части характеристики, вследствие чего машина работает более устойчиво и с меньшими колебаниями напряжения при изменении нагрузки.[1]

---

[1] На первый взгляд может показаться, что для получения устойчивой работы полезно было бы также допускать высокие магнитные насыщения в сердечнике якоря.

Имея в виду, однако, что якорь представляет собой вращающуюся часть

Все эти соображения должны быть приняты в расчет при выборе B_m и B_j для проектируемой машины. Значения B_m и B_j можно выбирать на основании данных следующей таблицы:

Наименование	B_m	B_j
Железо	15 000 17 000	12 000 15 000
Стальное литье . . .	15 000 17 000	11 000 14 000
Чугун	6 000 8 000	5 000 8 000

Указанные значения магнитных индукций в этой таблице относятся к машинам, не имеющим дополнительных полюсов.

При наличии последних во избежание чрезмерных насыщений в ярме следует при расчете брать значения B_j меньше на $10 \div 20\%$ (см. следующую главу).

§ 277. Расчет шунтовой обмотки возбуждения. Обозначим:

i_n — ток возбуждения;
q_n — сечение обмотки возбуждения;
w_n — число витков обмотки возбуждения;
l_n — средняя длина витка катушки возбуждения в cm.

Найдем величину сопротивления обмотки возбуждения:

$$R_n = \frac{1}{57} w_n \left(\frac{l_n}{100}\right) \frac{1}{q_n} (1 + 0{,}004 \ T_m). \qquad (277{,}1)$$

Средняя длина витка катушки l_n, входящая в это выражение, может быть найдена по чертежу или приближенно из уравнения

$$l_n = \pi (D_m + 5 \text{ cm}), \qquad (277{,}2)$$

где D_m — диаметр сердечника.

Ток, текущий в обмотке возбуждения при закороченном регулирующем сопротивлении, будет равен

$$i_{n\,\max} = \frac{U}{R_n}. \qquad (277{,}3)$$

Подставляя в (277,3) выражение для R_n, найдем

$$U = \frac{i_{n\,\max} w_n l_n (1 + 0{,}004 \ T_m)}{5\,700\, q_n}. \qquad (277{,}4)$$

Принимая во внимание, что

$$i_{n\,\max} w_n = AW_{\max},$$

машины, мы должны отказаться от повышенных магнитных насыщений в сердечнике якоря во избежание больших потерь на гистерезис и токи Фуко.

из уравнения (277,4) найдем

$$AW_{\max}=\frac{Uq_n 5\,700}{l_n(1+0{,}004\ T_m)}. \qquad (277{,}5)$$

Изучая эту формулу, мы приходим к несколько неожиданному на первый взгляд заключению, что число ампервитков $AW_{\max}$ зависит только от сечения обмотки возбуждения q_n и от напряжения U машины, но не зависит от числа витков обмотки возбуждения.[1]

Из уравнения (277,5) находим сечение проводов обмотки возбуждения:

$$q_n=\frac{AW_{\max}\,l_n(1+0{,}004\ T_m)}{U\,5\,700}(1{,}1\div 1{,}2).$$

Коэфициент (1,1 ÷ 1,2) введен в эту формулу для того, чтобы получить некоторый запас при расчете.

Действительно, может случиться, что выполненная машина не даст того напряжения, которое было предположено при расчете. Это может произойти, например, в случае непредвиденного при расчете появления внутри станины или полюсов раковин при отливке вследствие ненадлежащего качества железа и т. п.

Формула (277,5) показывает, что нельзя добиться повышения напряжения, наматывая добавочные витки на главные полюса и соединяя их последовательно с основными. Поэтому для исправления такой машины необходимо или перемотать обмотку возбуждения или намотать некоторое добавочное количество витков, соединив их параллельно с прежними.

Расчет шунтовой обмотки обычно ведется по следующей схеме:

1. Определяем сечение по формуле (277,5):

$$q_n=\frac{AW_{\max}\,l_n(1+0{,}004\ T_m)}{U\,5\,700}.$$

2. Задаемся плотностью тока в обмотке возбуждения s_n.
3. Определяем ток в шунтовой обмотке

$$i_n=s_n q_n.$$

4. Находим число витков шунтовой обмотки:

$$w_n=\frac{AW_{\max}}{i_{n\max}}.$$

---

[1] На первый взгляд может показаться, что при увеличении числа витков w_n обмотки возбуждения будут также возрастать и ампервитки, создаваемые этой обмоткой. Однако на самом деле, как показывает уравнение (277,5), этого нет. Объясняется этот факт следующим образом:

В случае возрастания числа витков w_n (при том же сечении q_n) происходит соответственное увеличение сопротивления R_n шунтовой обмотки, в результате чего ток i_n уменьшается; таким образом оказывается, что при возросшем w_n ток i_n делается меньше, так что произведение $i_n w_n$ остается приблизительно постоянным.

Плотность тока в шунтовой обмотке можно брать в зависимости от условий охлаждения в пределах

$$s_n = 1{,}2 \div 2{,}2 \text{ A/mm}^2.$$

Чаще всего величина s_n колеблется в границах $1{,}4 \div 1{,}7$ A/mm². В случае хорошей вентиляции и обдува катушек возбуждения охлаждающим воздухом плотность тока в проводах шунтовых катушек возбуждения может быть повышена до $3-4$ A/mm².

§ 278. Расчет последовательной обмотки возбуждения. В машине последовательного возбуждения число витков обмотки возбуждения w_s найдем из уравнения

$$w_s = \frac{AW_b}{I},$$

где AW_b — необходимое число ампервитков возбуждения при нормальной нагрузке,

I — нормальный ток машины.

Сечение проводов сериесной обмотки можно найти, задаваясь плотностью тока s_s:

$$q_s = \frac{I}{s_s} \text{ mm}^2.$$

Плотность тока при этом можно выбирать в пределах

$$s_s = 1 \div 1{,}7 \text{ A/mm}^2.$$

В трамвайных двигателях, нагрузка которых имеет переменный характер, эта величина берется обычно больше

$$s_s = 2 \div 3 \text{ A/mm}^2.$$

§ 279. Расчет обмотки смешанного возбуждения. Для того чтобы машина давала приблизительно постоянное напряжение при изменении нагрузки, необходимо иметь, как было указано выше, некоторое число добавочных ампервитков, изменяющихся с нагрузкой; эти добавочные ампервитки создаются обычно сериесной обмоткой возбуждения и равны Iw_s, где I — главный ток и w_s — число витков сериесной обмотки.

Поток возбуждения в машине смешанного возбуждения создается суммой ампервитков шунтовой обмотки AW_n и сериесной обмотки AW_s:

$$AW_b = AW_n + AW_s.$$

Таким образом для шунтовой обмотки мы имеем

$$q_n = \frac{AW_n l_n (1 + 0{,}004\ T_m)}{U 5700};$$

$$i_n = q \cdot s_n; \qquad w_n = \frac{AW_n}{i_n}.$$

Для сериесной обмотки находим

$$w_s = \frac{AW_b - AW_n}{I}; \qquad q_s = \frac{I}{s_s};$$

здесь w_s — число витков сериесной обмотки;

s_s — плотность тока в проводах сериесной обмотки;

AW_b — то суммарное число ампервитков, которое необходимо иметь, чтобы при нормальной нагрузке напряжение у зажимов машины было равно: $U \approx \text{const}$.

ГЛАВА ТРИДЦАТЬ ВТОРАЯ

РАСЧЕТ ДОПОЛНИТЕЛЬНЫХ ПОЛЮСОВ

§ 280. Магнитная индукция в воздушном промежутке под дополнительным полюсом. Магнитная индукция B_k в воздушном промежутке под дополнительным полюсом должна быть такой величины, чтобы реактивное напряжение e_r в короткозамкнутой секции обмотки якоря компенсировалось в каждый момент времени э. д. с. e_k, вызываемой дополнительными полюсами при вращении якоря.

Электродвижущую силу e_k можно найти из следующей формулы:

$$e_k = B_k 2wvl_{ki}\ 10^{-8} \text{ вольт},$$

где B_k — магнитная индукция в воздушном промежутке под дополнительным полюсом;

w — число витков в секции обмотки якоря;

v — окружная скорость якоря в cm/sec;

l_{ki} — расчетная длина полюсного наконечника дополнительного полюса.

Величина той части амплитуды реактивного напряжения, которая должна быть скомпенсирована, может быть найдена из уравнения

$$e_r = 2wvAS\lambda l_i 10^{-8}.$$

Необходимо, чтобы $e_k = e_r$;

$$B_k 2wvl_{ki} 10^{-8} = 2wvAS\lambda l_i 10^{-8},$$

откуда

$$B_k = \lambda AS \frac{l_i}{l_{ki}}. \qquad (280,1)$$

Обычно при существующих конструкциях по большей части можно бывает принять приближенно $l_i \approx l_{ki}$; в этом случае вышенаписанная формула приобретает более простой вид:

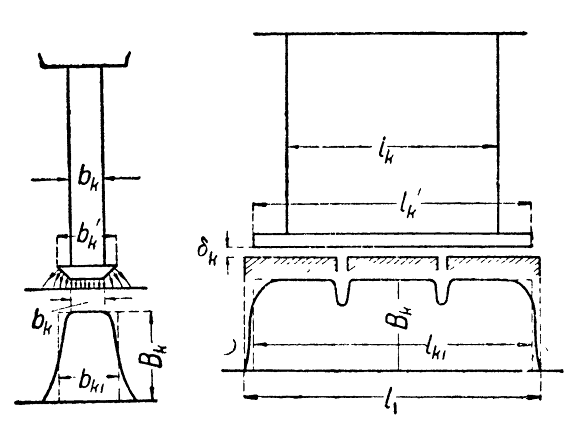
$$B_k = \lambda AS. \qquad (280,2)$$

§ 281. Кривая магнитной индукции в воздушном промежутке под дополнительным полюсом. На фиг. 487 показан примерный вид этой кривой.

Спланиметрировав кривые распределения B_k вдоль окружности якоря и вдоль оси якоря, построим соответственные равновеликие прямоугольники с высотой, равной B_k; таким образом найдем расчетную ширину полюсного наконечника b_{ki} и расчетную длину l_{ki}.

В большинстве случаев при расчетах можно приближенно принять согласно фиг. 487

$$b_{ki} \approx b_k'; \qquad l_{ki} \approx l_k'.$$



Фиг. 487. Магнитное поле дополнительного полюса.

При относительно большой величине воздушного промежутка δ_k или при отсутствии скоса у краев башмака дополнительного полюса (когда δ_k под всей поверхностью полюсного башмака имеет одну и ту же величину) b_{ki} можно находить по следующей формуле:

$$b_{ki} = b_k' + 2\delta_k.$$

§ 282. Поток дополнительного полюса. Величина потока Φ_k, создаваемого дополнительным полюсом в воздушном промежутке, будет

$$\Phi_k = B_k b_{ki} l_{ki}.$$

Поток в сердечнике Φ_k' будет больше, чем Φ_k, вследствие магнитного рассеяния:

$$\Phi_k' = \sigma\Phi_k.$$

Коэфициент магнитного рассеяния дополнительных полюсов благодаря размагничивающему действию ампервитков реакции якоря бывает обычно большим и колеблется в среднем в пределах 2,0 ÷ 4,0.

Вследствие магнитного рассеяния величина потока в разных сечениях дополнительного полюса имеет разную величину, возрастая по мере приближения к ярму, к которому привернут сердечник полюса. Поэтому при расчете ампервитков обычно приходится вводить некоторую среднюю величину потока.

$$\Phi_{k\,cp} = \frac{\Phi_k' + \Phi_k}{2} = \frac{\sigma\Phi_k + \Phi_k}{2} = \Phi_k\left(\frac{1+\sigma}{2}\right).$$

Полагая в среднем $\sigma = 2{,}0 - 4{,}0$, найдем

$$\Phi_{k\,cp} = \Phi_k\,(1{,}5 \div 2{,}5).$$

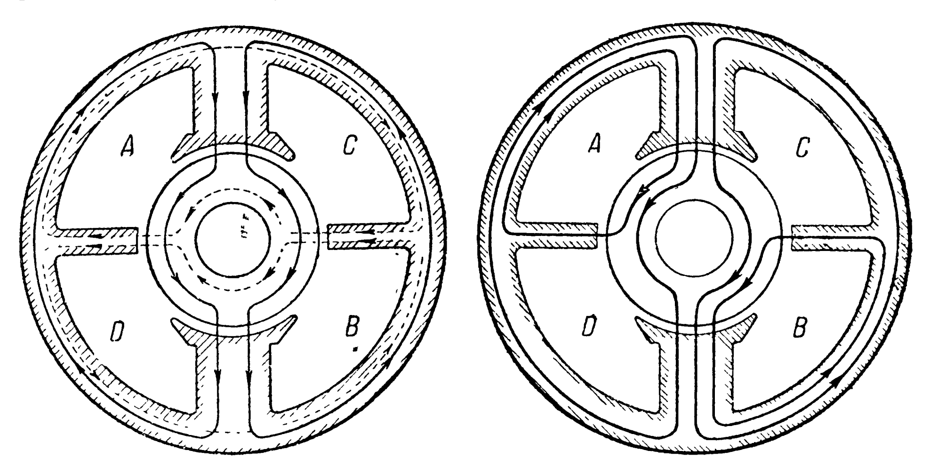
§ 283. Сечение дополнительного полюса. Для того чтобы коммутация машины происходила удовлетворительно при всех нагрузках, необходимо, чтобы магнитный поток дополнительных полюсов возрастал прямо пропорционально силе тока якоря машины I; отсюда следует, что дополнительные полюса должны быть по возможности насыщены слабо. Поэтому магнитная индукция в сердечнике дополнительного полюса при нормальной работе по возможности не должна превосходить в среднем

$$B_k' \leqslant 6\,000 \div 8\,000 \text{ Gs}.$$

Задаваясь величиной B_k', можем найти сечение сердечника дополнительного полюса

$$Q_k = \frac{\Phi_k'{}_{cp}}{B_k'}.$$

§ 284. Путь силового потока дополнительного полюса. На фиг. 488 показан путь силового потока, создаваемого главными



Фиг. 488.

Фиг. 489. Картина распределения потоков главных и дополнительных полюсов.

полюсами (сплошные линии), и путь потока дополнительных полюсов (пунктирные линии). Оба потока в ярме накладываются друг на друга, и в результате получается картина распределения потоков, показанная на фиг. 489. Как видно из этой фигуры, в квадрантах A и B потоки складываются, в результате чего здесь происходит усиление магнитной индукции; наоборот, в квадрантах C и D потоки вычитаются, и магнитная индукция здесь ослаблена.

На основании фиг. 489 ясно, что магнитное насыщение в ярме и в главных полюсах, вызываемое главным потоком, должно

влиять не только на характеристику главных полюсов, но также и на характеристику дополнительных полюсов.

Поэтому, желая получить характеристику дополнительных полюсов прямолинейной, мы не должны допускать при расчете особенно больших магнитных индукций в ярме; обычно рекомендуется брать $B_j \leqslant 10\,000$ Gs при железном ярме и $B_j \leqslant 8\,000$ Gs — при чугунном.

ГЛАВА ТРИДЦАТЬ ТРЕТЬЯ

ПРИМЕР РАСЧЕТА ГЕНЕРАТОРА ШУНТОВОГО ВОЗБУЖДЕНИЯ

Задание. Необходимо спроектировать шунтовой генератор на 300 kW, 140 об/мин и 230 V напряжения. Для получения коммутации без искрообразования машина должна быть снабжена дополнительными полюсами.

Температура частей машины не должна превосходить допускаемых „Нормами" пределов.

I. ЯКОРЬ

1. Сила тока в якоре. Найдем величину нормального тока, текущего во внешней цепи:

$$I = \frac{P_{(kw)}}{U_{(v)}} \cdot 1\,000 = \frac{300 \cdot 1\,000}{230} = 1\,300 \text{ A}.$$

Ток в якоре I_a будет больше на величину тока возбуждения i_n. Для предварительного расчета предположим, что ток возбуждения машины составляет 1,5% от нормального тока:

$$i_n = 0{,}015 \cdot 1\,300 \approx 20 \text{ A}.$$

Таким образом ток в якоре машины будет

$$I_a = 1\,300 + 20 = 1\,320.$$

2. Основные размеры. Теперь можно приступить к весьма важной части расчета: выяснению основных размеров D и l_i. Для этой цели обратимся к основному уравнению

$$\frac{D^2 l_i n}{P_{(kw)}} = \frac{6 \cdot 10^{11}}{\alpha_i B_l AS} = C.$$

По кривой фиг. 473 найдем величину машинной постоянной для данной мощности:

$$C \approx 27 \cdot 10^4.$$

Таким образом имеем

$$\frac{6 \cdot 10^{11}}{\alpha_i B_l AS} = C = 27 \cdot 10^4,$$

отсюда найдем

$$\alpha_i B_l \cdot AS = \frac{6 \cdot 10^{11}}{27 \cdot 10^4} = 22{,}2 \cdot 10^5.$$

Выберем величины α_i, B_l и AS таким образом, чтобы их произведение приблизительно было равным вышенайденной величине $22{,}2 \cdot 10^5$.

После нескольких проб остановимся на следующих наиболее подходящих для машины данной мощности значениях (в округленных цифрах):

$$B_l = 9\,000;$$
$$AS = 350;$$
$$\alpha_l = 0{,}70.$$

Подставим значения этих величин в основное расчетное уравнение

$$\frac{D^2 l_i \cdot 140}{300} = \frac{6 \cdot 10^{11}}{0{,}70 \cdot 9\,000 \cdot 350},$$

откуда

$$D^2 l_i = 58{,}5 \cdot 10^4.$$

Мы получили одно уравнение с двумя неизвестными (D и l_i). Такое уравнение допускает бесконечно большое число решений. Из всех этих решений нам необходимо выбрать одно, дающее наилучшее решение задачи как с конструктивной точки зрения, так и с точки зрения стоимости машины.

Имея в виду выполнить якорь машины с петлевой стержневой обмоткой, выбираем число полюсов $2p$ машины таким образом, чтобы в каждой параллельной ветви якоря протекал ток силой около $150 \div 170$ А.

Если выбрать число полюсов $2p = 8$, то получится ток в параллельном разветвлении

$$i_a = \frac{I}{2p} = \frac{1\,320}{8} = 165 \text{ A}.$$

У нас получилась приемлемая величина i_a, поэтому примем для нашей машины $2p = 8$.

Задаваясь различными значениями l_i в полученном выше уравнении, найдем соответственные значения D; результат подсчетов занесен в нижеследующую таблицу:

l_i	D	$\tau = \frac{\pi D}{2p}$	$b_i = \alpha\tau$	$\frac{l_i}{b_i}$	v
25	153	60,0	42,0	0,59	11,2
30	139	54,5	38,2	0,78	10,1
35	129	50,5	35,4	0,99	9,5

Из всех вариантов, приведенных в этой таблице, выберем вариант с данными:

$$D = 140 \text{ cm (округленная цифра)};$$
$$l_i = 30 \text{ cm};$$
$$\tau = \frac{\pi D}{2p} = \frac{\pi \cdot 140}{8} = 55 \text{ cm};$$
$$b_i = 0{,}7 \cdot 55 = 38{,}5 \text{ cm};$$
$$v = \frac{\pi D n}{60} = \frac{\pi \cdot 140 \cdot 140}{60} = 10{,}2 \text{ m/sec}.$$

3. Конструктивная длина якоря. Выше мы установили расчетную длину якоря $l_i = 30$ cm.

Теперь нам надлежит найти длину якоря машины (включая сюда длину всех железных пакетов и вентиляционных каналов).

В нашем якоре (согласно фиг. 490) предусмотрены три вентиляционных промежутка $n_s = 3$ шириной каждый $b_s = 1$ cm. Длину полюсного наконечника l_p возьмем короче длины якоря l_1 на величину $2m$ с целью обезопасить два

крайних массивных нажимных листа от проникновения в них силовых линий потока полюсов.

Последнее является нежелательным, так как магнитный поток, заходя в железо якоря с боков и пронизывая боковые крайние железные листы (которые имеют обычно относительно большую толщину), будет при вращении якоря наводить в вышеуказанных листах большие токи Фуко, что повысит нагрев якоря машины и скверно отзовется на величине к. п. д.

Имеем

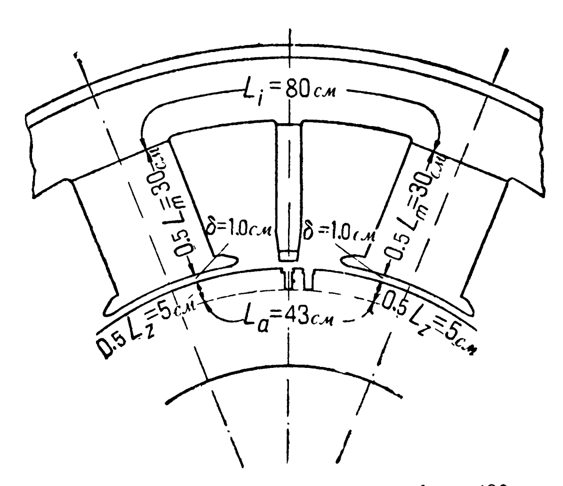
$$l_p = l_1 - 2m;\ l_1 = l + n_s b_s;\ l_p = l + n_s b_s - 2m.$$

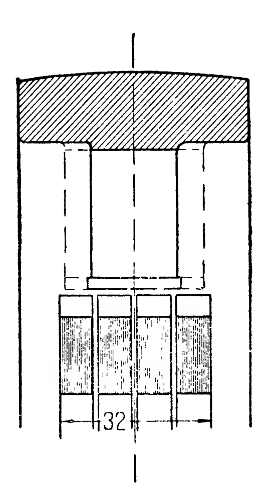
Расчетная длина якоря может быть приближенно принята равной

$$l_i \approx \frac{l + l_p}{2},$$

откуда

$$l_i = \frac{l + l + n_s b_s - 2m}{2} = l + 0{,}5 n_s b_s - m.$$





Фиг. 490.

Подставляя в эту формулу

$$l_i = 30,$$
$$n_s = 3,$$
$$b_s = 1,$$
$$m = 0{,}5,$$

найдем

$$30 = l + 0{,}5 \cdot n_s b_s - m = l + 0{,}5 \cdot 3 \cdot 1 - 0{,}5,$$

откуда

$$l = 29 \text{ cm}.$$

Таким образом длина каждого железного пакета будет

$$\frac{l}{4} = \frac{29}{4} = 7{,}25 \text{ cm},$$

и вся длина якоря (включая вентиляционные каналы) выражается

$$l_1 = l + n_s b_s = 29 + 3 \cdot 1 = 32 \text{ cm},$$

Длина полюсного наконечника будет

$$l_p = l_1 - 2m = 32 - 2 \cdot 0{,}5 = 31 \text{ cm}.$$

4. Число проводов в якоре. Внешние размеры якоря найдены. Для того чтобы покончить с расчетом якоря, нам надлежит еще выяснить число зубцов и форму пазов.

Для этого нам необходимо иметь сведения о числе проводов N в обмотке якоря; последнее число мы можем найти в первом приближении из уравнения

$$N = \frac{\pi D \cdot AS}{i_a} = \frac{\pi \cdot 140 \cdot 350}{165} \approx 932.$$

(В дальнейшем это число N, может быть, понадобится немного изменить в ту или другую сторону, для того чтобы вся обмотка уложилась в пазы и были соблюдены „обмоточные формулы").

5. Число пазов. Найденное выше приближенное число проводов N необходимо теперь разместить в пазах якоря; для этой цели сначала следует выяснить необходимое число пазов Z.

Число пазов якоря зависит от того числа проводов u_n, лежащих в одном пазу, которое мы выберем при расчете. Чем больше мы возьмем u_n, тем будет меньше Z; малое Z выгодно в отношении удешевления стоимости фабрикации машины. Кроме того, при малом Z толщина зубцов получается больше, что приводит к прочным механическим конструкциям. Однако чрезмерно крупные зубцовые деления (малое Z), как мы видели выше, ухудшают условия коммутации. При расчетах обычно выбирают величину Z таким образом, чтобы на одно полюсное деление приходилось в среднем не меньше $12 \div 15$ пазов.

Выбирая $u_n = 8$, найдем

$$Z = \frac{N}{u_n} = \frac{932}{8} \approx 117.$$

Число зубцов, приходящееся на одно полюсное деление, при этом будет

$$\frac{Z}{2p} = \frac{117}{8} = 14{,}6.$$

Округлим последнюю величину до ближайшего целого числа:

$$\frac{Z}{2p} = 15.$$

Произведем пересчет и найдем окончательно величины:

$$Z = 15 \cdot 8 = 120 \text{ зубцов},$$

$$N = 120 \cdot 8 = 960 \text{ проводов}.$$

Полученное число N несколько отличается от того, которое мы получили приближенно в начале расчета; поэтому пересчитаем величину линейной нагрузки якоря:

$$AS = \frac{960}{932} \cdot 350 = 360.$$

6. Обмотка якоря. В машинах большой мощности и среднего напряжения обычно применяется шлейфовая обмотка; имея это в виду, выберем шлейфовую стержневую обмотку с числом витков в одной секции $w = 1$ и с числом параллельных ветвей

$$2a = 2p = 8.$$

Теперь необходимо выбрать частичные шаги нашей обмотки:

$$y_1 = \frac{N \pm b}{2p};$$

$$y_2 = y_1 \pm 2,$$

Число b, входящее в вышенаписанные формулы, необходимо выбрать таким образом, чтобы было соблюдено условие выполнимости шаблонной обмотки:

$$y_1 = y_n u_n + 1.$$

Величину зубцового шага y_n, входящего в последнюю формулу, выберем таким образом, чтобы ширина секции обмотки якоря была приблизительно равна полюсному делению; имея это в виду, найдем

$$y_n = \frac{Z}{2p} = \frac{120}{8} = 15 \text{ зубцов.}$$

Таким образом найдем первый частичный шаг обмотки

$$y_1 = 15 \cdot 8 + 1 = 121.$$

Подставим в вышеприведенную формулу для частичного шага y_1 различные целые числа b с таким расчетом, чтобы в результате получился шаг

$$y_1 = 121.$$

После нескольких проб найдем

$$y_1 = \frac{N \pm b}{2p} = \frac{960 \pm b}{8} = \frac{960 + 8}{8} = 121.$$

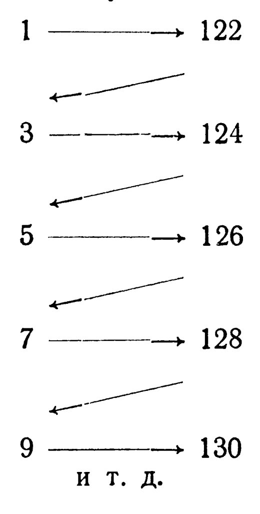
Полученное уравнение показывает, что шаг y_1 немного удлинен (если бы получилось $b = 0$, то мы бы имели диаметральную обмотку). Второй частичный шаг будет

$$y_2 = y_1 \pm 2 = 121 \pm 2.$$

Имея в виду, что первый частичный шаг удлинен, выбираем в вышенаписанной формуле знак „минус", после чего получим окончательно

$$y_2 = 121 - 2 = 119.$$

Таким образом у нас получится следующая таблица обмотки:



и т. д.

7. Уравнительные соединения. Обычно при большом числе полюсов ($2p \geqslant 6$) рекомендуется устройство в якоре машины постоянного тока уравнительных соединений во избежание неравномерной нагрузки щеток на коллекторе и связанного с этим явления искрения.

Наша машина имеет большое число полюсов, и мощность ее относительно

велика, поэтому уравнительные соединения здесь необходимы. Общее число коллекторных пластин у нас будет

$$K=\frac{N}{2w}=\frac{960}{2\cdot 1}=480.$$

Шаг уравнительных соединений на коллекторе будет

$$y_p=\frac{K}{a}=\frac{480}{4}=120.$$

Таким образом к какому-либо уравнительному кольцу будут присоединены следующие коллекторные пластины (фиг. 491):

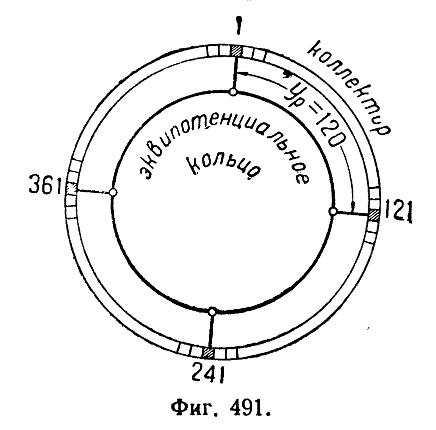
$$1-121-241-361.$$

Теперь необходимо решить вопрос об общем количестве уравнительных колец для нашего якоря. Чем будет больше таких колец, тем будет совершенней происходить выравнивание тока, текущего в ветвях якоря. Однако чрезмерно большое число уравнительных соединений создаст некоторые конструктивные затруднения и вызовет удорожание машины. В машинах быстроходного типа (например, турбогенераторах) делают обычно большое число уравнительных соединений. В тихоходных машинах, в которых меньше оснований ожидать затруднения коммутации, можно довольствоваться меньшим числом уравнительных соединений.

Имея это в виду, в нашей машине выполним по одному уравнительному соединению на каждый второй паз.

Число коллекторных пластин, приходящихся на один паз, у нас будет

$$\frac{K}{Z}=\frac{\left(\frac{N}{2}\right)}{\left(\frac{N}{u_n}\right)}=\frac{u_n}{2}=\frac{8}{2}=4.$$



Фиг. 491.

Число коллекторных пластин, заключающихся между двумя присоединенными уравнительными кольцами, будет

$$y_p'=2\cdot\frac{K}{Z}=2\cdot 4=8.$$

Это значит, что каждая девятая пластина коллектора должна быть присоединена к уравнительному кольцу.

Выполнив уравнительные соединения, мы можем быть уверены, что в случае возможной несимметричности магнитной системы выравнивающие токи будут течь только внутри обмотки якоря, не заходя в соединительные провода между одноименными щетками и не создавая затруднений коммутации.

К каждому уравнительному кольцу у нас будет сделано $a=4$ присоединений (фиг. 491).

Так как у нас к уравнительным кольцам будет присоединена каждая девятая коллекторная пластина ($y_p'=8$), то общее число эквипотенциальных колец будет

$$\frac{K}{ay_p'}=\frac{480}{4\cdot 8}=15.$$

Таким образом у нас будет 15 уравнительных колец, из которых каждое будет иметь четыре присоединения к коллектору.

Таблица уравнительных соединений

Кольцо	I	II	III	— — — — — — — —	XV
Коллекторные пластины	*1* *121* *241* *361*	*9* *129* *249* *369*	*17* *137* *257* *377*	— —	— — — —

Вышеприведенная таблица показывает, что к кольцу *I* присоединены коллекторные пластины: *1 — 121 — 241 — 361*; к кольцу *II* присоединены коллекторные пластины: *9 — 129 — 249 — 369* и т. д.

Сечение каждого уравнительного кольца возьмем около $\frac{1}{2}$ сечения проводов обмотки якоря, т. е.

$$q_y = \frac{q_a}{2} = \frac{54{,}0}{2} \approx 27 \text{ mm}^2$$ [1]

В качестве уравнительного кольца возьмем медную ленту $2 \times 13{,}5$ mm.

8. **Сечение проводов обмотки якоря.** Решая вопрос о выборе сечения обмотки якоря, приходится при расчете машины иметь в виду следующие два обстоятельства:

С одной стороны, при больших сечениях q_a проводов обмотки якоря потери на джоулево тепло соответственно уменьшаются: в связи с увеличением q_a площадь пазов получается большой, зубцы делаются тоньше, и потери железа возрастают; кроме того, в связи с утоньшением зубцов магнитное сопротивление цепи возрастает, что требует соответственного увеличения числа витков обмотки возбуждения.

Таким образом чрезмерное увеличение сечения проводов якоря q_a в конце концов приводит к увеличению количества меди обмотки возбуждения.

С другой стороны, допуская большие плотности тока s_a в проводах якоря, мы получаем меньшее сечение пазов, железные зубцы якоря получаются большей толщины, магнитное сопротивление цепи в соответственной мере уменьшится, и вес меди обмотки возбуждения также получается меньше. Таким образом уменьшение сечения проводов якоря в конце концов приводит к некоторой экономии меди не только в самом якоре, но также и в полюсах возбуждения.

На основании приведенных выше соображений следует выбирать сечение обмотки якоря возможно меньше, насколько это позволяют условия нагрева обмотки якоря.

Мы видели выше, что нагрев якоря возрастает пропорционально произведению

$$AS \cdot s_a;$$

поэтому следует выбирать плотность тока s_a, сообразуясь с величиной линейной нагрузки AS.

По Рихтеру [2] плотность тока в обмотке якоря можно выбирать в следующих пределах:

$$1\,000 < ASs_a < 1\,800.$$

В нашем случае мы имеем

$$s_a = \text{от } \frac{1\,000}{AS} \text{ до } \frac{1\,800}{AS}.$$

$$s_a = \frac{1\,000}{360} \div \frac{1\,800}{360} = 2{,}78 \div 5{,}0 \text{ A/mm}^2.$$

Лакур [3] советует выбирать плотность тока в якоре в следующих пределах:

---

[1] Сечение q_a дано ниже.

[2] См. Рихтер, Электрические машины.

[3] См. Арнольд-Лакур, Машины постоянного тока.

$$500 < \frac{AS \cdot s_a}{1 + 0,1v} < 600.$$

Подставляя сюда $v = 10,2$ m/sec, найдем

$$s_a = \frac{500}{AS}(1+0,1 \cdot 10,2) \div \frac{600}{AS}(1 + 0,1 \cdot 10,2);$$

$$s_a = \frac{1\,010}{AS} \text{ до } \frac{1\,210}{AS};$$

$$s_a = \frac{1\,010}{360} \text{ до } \frac{1\,210}{360} = 2,81 \div 3,36 \text{ A/mm}^2.$$

На основании последних данных выберем среднюю величину плотности тока $s_a = 3,0$ A/mm².

В этом случае сечение якоря будет

$$q_a \approx \frac{i_a}{s_a} = \frac{165}{3,0} \approx 55 \text{ mm}^2.$$

В качестве провода для обмотки якоря возьмем медную ленту размером

$$18 \times 3 = 54 \text{ mm}^2.$$

9. Паз (фиг. 492). В каждом пазу расположим по восемь проводов в два слоя.

Изоляция проводов и паза у нас следующая:

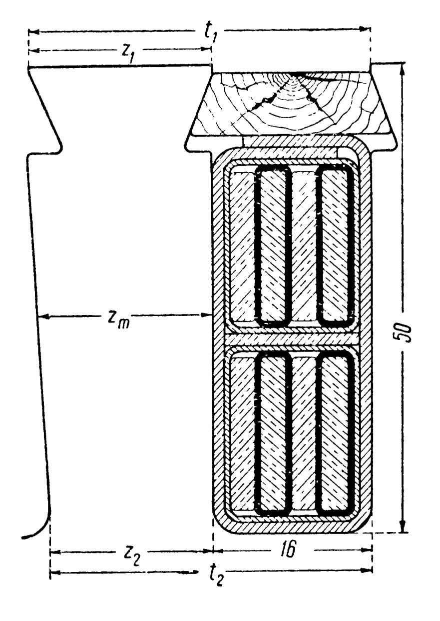
1. Второй и четвертый провода изолированы двумя оборотами хлопчатобумажной ленты по 0,2 mm; первый и третий провода изолированы так же.

2. Пучок из четырех проводов изолирован одним слоем слюды по 0,2 mm и двумя оборотами ленты по 0,2 mm.

3. Весь изолированный согласно вышеописанному пучок проводов должен быть пропитан горячим изолирующим лаком и затем просушен в сушильной печи.

4. Перед закладкой пучка проводов в паз последний должен быть изолирован латероидом толщиной в 0,5 mm.

5. Между пучком верхнего и нижнего слоя должен быть проложен прессшпан толщиной 0,5 mm.



Фиг. 492. Паз машины постоянного тока.

Необходимая ширина паза определится следующим образом:

1) 4 медных проводов шириной по 3,0 mm . .	. 4·3,0 =	12,0 mm
2) 12 слоев хлопчатобумажной ленты по 0,2 mm . .	12·0,2 =	2,4 „
3) 2 слоя слюды по 0,2 mm	2·0,2 =	0,4 „
4) 2 слоя латероида по 0,5 mm	2·0,5 =	1,0 „
5) Зазор.		1,2 „
Итого.		16,0 mm

Высота паза определится следующим образом:

1) 2 медных провода высотой по 18 mm	2 · 18 =	36,0	mm
2) 2 × 8 слоев хлопчатобумажной ленты по 0,2 mm	16 · 0,2 =	3,2	"
3) 2 × 2 слоя слюды по 0,2 mm	4 · 0,2 =	0,8	"
4) Прокладка из прессшпана между двумя слоями .		0,5	"
5) 3 слоя латероида (один оборот с перекрышкой)	3 · 0,5 =	1,5	"
6) Клин		7,0	"
7) Зазор		1,0	"
Итого		50	mm

Зная размеры паза (50 × 16) и сечение проводов (8 × 54), найдем коэфициент заполнения паза

$$f = \frac{8 \cdot 54{,}0}{50 \cdot 16} = 0{,}54.$$

10. Зубцы. Зная число зубцов Z, можем найти зубцовое деление

$$t_1 = \frac{\pi D}{Z} = \frac{\pi\, 1\,400}{120} = 36{,}6 \text{ mm}.$$

Зубцовое деление у основания зубцов будет

$$t_2 = \frac{\pi (D - 2h_z)}{Z} = \frac{\pi (140 - 2 \cdot 5{,}0)}{120} = 34{,}0 \text{ mm}.$$

Зная ширину паза $a = 16$ mm, найдем максимальную ширину зубца

$$z_1 = t_1 - a = 36{,}6 - 16 = 20{,}6 \text{ mm}.$$

Минимальная ширина зубца будет

$$z_2 = t_2 - a = 34{,}0 - 16 = 18{,}0 \text{ mm}.$$

Найдем также необходимую при дальнейших расчетах среднюю ширину зубца

$$z_m = \frac{z_{\max} + z_{\min}}{2} = \frac{20{,}6 + 18}{2} = 19{,}3 \text{ mm}.$$

11. Величина потока главных полюсов при холостом ходе. Мы нашли внешний диаметр якоря и выяснили форму и размеры пазов и зубцов.

Теперь нам необходимо найти величину диаметра внутренней расточки якоря; последнюю величину мы можем подсчитать только после того, как нам будет известна величина магнитного потока Φ_a.

Величину потока Φ_a найдем из уравнения

$$E_a = \frac{p}{a} \cdot \frac{n}{60} N \Phi_a \cdot 10^{-8} \text{ вольт},$$

откуда

$$\Phi_a = E_a \frac{a}{N} \cdot \frac{60}{pn} 10^{8} .$$

Подставляя в эту формулу известные уже нам величины:

$$N = 960;\ n = 140;\ E_a \approx 230 \text{ V},\ a = p,$$

найдем

$$\Phi_a = E_a \frac{60}{Nn} 10^8 = \frac{230 \cdot 60 \cdot 10^8}{960 \cdot 140} = 10{,}3 \cdot 10^6.$$

12. Магнитная индукция в воздушном промежутке. Найдем величину магнитной индукции в воздушном промежутке при холостом ходе:

$$B_l = \frac{\Phi_a}{l_i b_i} = \frac{10{,}3 \cdot 10^6}{30 \cdot 38{,}5} = 8\,900.$$

При нагрузке э. д. с E_a будет больше U на величину падения напряжения в арматуре; оценивая последнее в 4%, найдем

$$E_a = 1{,}04\ U.$$

Поэтому поток при нагрузке будет:

$$\Phi_a' = 1{,}04;\ \Phi_a = 1{,}04 \cdot 10{,}3 \cdot 10^6 = 10{,}7 \cdot 10^6;$$

$$B_l' = 1{,}04,\quad B_l = 1{,}04 \cdot 8\,900 = 9\,250.$$

13. Внутренний диаметр сердечника якоря. Для выяснения всех размеров якоря нам нехватает еще одной величины: значения высоты h_a сердечника якоря.

Эту высоту h_a следует выбирать таким образом, чтобы потери железа (на гистерезис и вихревые токи) в сердечнике якоря не были чрезмерно велики; поэтому магнитную индукцию в сердечнике B_a следует при расчете выбирать тем меньше, чем больше циклов перемагничивания f в секунду мы имеем в якоре.

В нашем случае

$$f = \frac{pn}{60} = \frac{4 \cdot 140}{60} = 9{,}3.$$

При такой относительно малой величине f (согласно данным § 270) можно задаться $B_a = 12\,000$, тогда

$$h_a = \frac{\Phi_a}{2k_2 l B_a},$$

где k_2 — коэфициент изоляции железа (для нашего случая можно взять равным 0,9)

$$h_a = \frac{10{,}7 \cdot 10^6}{2 \cdot 0{,}9 \cdot 29 \cdot 12\,000} \approx 17{,}0\ \text{cm}.$$

14. Коллектор и щетки. Найдем число коллекторных пластин

$$K = \frac{N}{2} = \frac{960}{2} = 480\,.$$

Коллекторное деление примем

$$\beta_k = \beta + \beta_i = 0{,}6 + 0{,}08 = 0{,}68\ \text{cm}.$$

Тогда диаметр коллектора будет

$$D_k = \frac{K\beta_k}{\pi} = \frac{480 \cdot 0{,}68}{\pi} = 104\ \text{cm}.$$

Найдем отношение

$$\frac{D_k}{D} = \frac{104}{140} \approx 0{,}74,$$

т. е. диаметр коллектора будет меньше диаметра якоря на 26%.

Найдем окружную скорость на коллекторе

$$v_k = \frac{\pi D_k n}{60} = \frac{\pi 104 \cdot 140}{66} = 7{,}6\ \text{m/sec}.$$

Найдем среднюю разность потенциалов между смежными пластинами

$$e_{cp} = \frac{U2p}{K} = \frac{230 \cdot 8}{480} \approx 4{,}0\ \text{V}.$$

Максимальная разность потенциалов будет

$$e_{\max} = \frac{\pi p U}{K} = \frac{\pi \cdot 4 \cdot 230}{480} = 6{,}0\ \text{V}.$$

Полученные небольшие величины e_{cp} и e_{max} дают основание думать, что при работе машина не будет обладать наклонностью к образованию „кругового огня" на коллекторе.

Для окончательного выяснения размеров коллектора нам нехватает его длины l_k. Последняя величина находится в зависимости от размеров и числа щеток, сидящих на щеточном стержне.

Число щеточных стержней у нас будет

$$2p = 8.$$

Найдем ток в щеточном стержне

$$I_1 = \frac{2I_a}{8} = \frac{2 \cdot 1\,320}{8} = 330 \text{ A}.$$

Возьмем щетки средней твердости размером 20×30 mm.

Число перекрытых щеткой пластин при этом будет

$$\frac{20}{6{,}8} = 2{,}94.$$

Поверхность рабочего контакта каждой щетки будет

$$F_b = 2{,}0 \cdot 3{,}0 = 6{,}0 \text{ cm}^2.$$

Найдем необходимое число щеток на одном щеточном стержне, принимая допускаемую величину плотности тока в контакте

$$s_b = 6 \text{ A/cm}^2;$$

$$n = \frac{330}{6 \cdot 6} \approx 9 \text{ щеток.}$$

Предполагая, что расстояние между смежными краями щеток одного стержня, измеряемое вдоль оси коллектора, будет равно 5 mm, и оставляя с обоих краев коллектора расстояние в 1,0 cm, найдем длину коллектора

$$l_k = 9 \cdot 3 + 8 \cdot 0{,}5 + 2 \cdot 1{,}0 = 33{,}0 \text{ cm}.$$

II. ЭЛЕКТРОМАГНИТЫ И СТАНИНА

15. Воздушный промежуток. Мы закончили расчет машины в части, касающейся якоря.

Прежде чем перейти к проектированию магнитной системы, выясним еще одну важную величину, от которой в сильной степени зависит поведение машины при работе: величину воздушного промежутка δ.

Чем больше мы выберем δ, тем меньше будет искажаться кривая магнитной индукции в воздушном зазоре, создаваемая электромагнитами возбуждения, и тем устойчивее будет работать машина.

С другой стороны, большой воздушный промежуток требует соответственного увеличения ампервитков возбуждения, что удорожает машину.

Имея в виду, что машина должна иметь дополнительные полюса, величину воздушного промежутка найдем из уравнения

$$\delta = 0{,}5 \frac{\tau AS}{B_l} = 0{,}5 \frac{55 \cdot 360}{9\,250} \approx 10{,}7 \text{ mm}.$$

Округляя, примем окончательно

$$\delta = 10 \text{ mm}.$$

16 Главные полюса. Главные полюса выполнены из листового железа толщиной в 1 mm.

Расчет полюсов начнем с выяснения размеров полюсного наконечника.

Связь между расчетной величиной дуги b_i и действительной длиной b по

чертежу может быть выражена при помощи следующего эмпирического уравнения:

$$b_i \approx b + 2{,}5\ \delta,$$

откуда

$$b = b_i - 2{,}5\ \delta;$$

$$b = 38{,}5 - 2{,}5 \cdot 1{,}0;$$

$$b = 38{,}5 - 2{,}5 = 36\ \text{cm}.$$

Выбираем $b = 36$ cm.

Зная размеры полюсного наконечника, перейдем к выяснению сечения Q_m полюсного сердечника; для нахождения Q_m необходимо знать величину потока Φ_m в сердечнике, который больше потока в якоре Φ_a в отношении коэфициента рассеяния:

$$\Phi_m = \sigma\Phi_a.$$

Коэфициент магнитного рассеяния найдем по формуле

$$\sigma = 1 + \delta\left(\frac{c_1}{\tau} + \frac{c_2}{l_i}\right);$$

подставляя в эту формулу величины

$$\delta = 1{,}0;\ \tau = 55;\ l_i = 30;\ c_1 = 4{,}0;\ c_2 = 2{,}0,$$

найдем

$$\sigma = 1 + 1{,}0\left(\frac{4{,}0}{55} + \frac{2{,}0}{30}\right) \approx 1{,}14.$$

Магнитный поток в сердечнике будет

$$\Phi_m = \sigma\Phi_a = 1{,}14 \cdot 10{,}3 \cdot 10^6 = 11{,}7 \cdot 10^6.$$

Задаваясь величиной магнитной индукции в сердечнике $B_m = 17\,000$, найдем сечение

$$Q_m = \frac{11{,}5 \cdot 10^6}{17\,000} \approx 690\ \text{cm}^2.$$

Ввиду того что полюсный сердечник предполагается выполнить из листового железа, сечение сердечника будет прямоугольной формы. Примем осевую длину сердечника $l_p = 31$ cm (немного меньше, чем длина якоря $l_1 = 32$ cm).

Ширину сердечника b_m найдем из следующего уравнения:

$$Q_m = b_m \cdot l_p \cdot 0{,}95.$$

Здесь коэфициент 0,95 учитывает уменьшение полезного сечения, обусловленное конструкцией полюса, набранного из железных листов; из вышенаписанного соотношения получаем

$$b_m = \frac{Q_m}{0{,}95 \cdot l_p} = \frac{690}{0{,}95 \cdot 31} = 23{,}4\ \text{cm}.$$

Возьмем $b_m = 24$ cm, таким образом сердечник полюса у нас будет иметь очертания прямоугольника размером 31×24 cm.

17. Высота сердечника главных полюсов. Высота сердечника полюса должна быть выбрана с таким расчетом, чтобы свободно могла уместиться на этом сердечнике обмотка возбуждения.

Размеры последней, однако, мы можем найти точно только после того, как будут известны очертания магнитной цепи.

Поэтому найдем вначале высоту полюса, применяя эмпирическую формулу автора

$$h_m \approx \frac{\tau AS}{600 \div 700};$$

у нас

$$\tau = 55,$$

$$AS = 360;$$

поэтому

$$h_m \approx \frac{55 \cdot 360}{600 \div 700} = 330 \div 283.$$

Выберем среднюю величину

$$h \approx 30 \text{ cm}.$$

18. **Станина.** Станину выполним из чугуна. $B_i = 8\,000$, найдем сечение станины.

Задаваясь магнитной индукцией,

$$Q_j = \frac{\Phi_m}{2B_j} = \frac{\sigma\Phi_a}{2B_j} = \frac{11{,}7 \cdot 10^6}{2 \cdot 8\,000} = 730 \text{ cm}^2.$$

19. **Коммутация.** а) Ширина полюсного наконечника дополнительного полюса.

Приведенная ширина щетки

$$b_D = b\,\frac{D}{D_k} = 2 \cdot \frac{140}{104} = 2{,}7 \text{ cm}.$$

Ширина коммутационной зоны:

$$b_k = b_D + \frac{u_n - 2}{u_n}\,t_1 = 2{,}7 + \frac{8-2}{2} \cdot 3{,}66 = 5{,}45 \text{ cm}.$$

Ширина полюсного наконечника дополнительного полюса

$$b_d = b_k - 2\delta_k.$$

Возьмем $\delta_k = 1{,}0$ cm;

$$b_d = 5{,}45 - 2 \cdot 1 = 3{,}45.$$

Округляем:

$$b_d = 3{,}5 \text{ cm}.$$

б) Удельная магнитная проводимость секции λ (т. е. расчетная удельная проводимость, отнесенная к двум секционным сторонам).

Размеры паза:

$$b_n = 1{,}6 \text{ cm};$$
$$r = 1{,}8 \text{ cm};$$
$$r_0 = 0{,}7 \text{ cm}.$$

Удельная проводимость рассеяния паза (на две секционных стороны):

$$2\lambda_n = \frac{1{,}25}{3b_n}(5r + 2r_0) = \frac{1{,}25}{3 \cdot 1{,}6}(5 \cdot 1{,}8 + 2{,}07) = 2{,}7.$$

Удельная проводимость „коронок" зубцов (на две секционные стороны)

$$2\lambda_z = 2 \cdot 0{,}15\,\frac{b_d}{\delta_k'} = 2 \cdot 0{,}15\,\frac{3{,}5}{1{,}14} = 0{,}92.$$

Удельная проводимость торцевых частей секции (на две секционных стороны)

$$2\lambda_b' = 2\,\frac{l_b}{l}\,\lambda_b = 2\,\frac{80}{29} \cdot 0{,}6 \doteq 3{,}32.$$

Результирующая удельная проводимость (на две секционные стороны)

$$\lambda = 2\lambda_n + 2\lambda_z + 2\lambda_b' = 2{,}7 + 0{,}92 + 3{,}32 = 6{,}94.$$

в) Реактивная э. д. с.

$$e_r = 2w \cdot v \cdot AS \cdot l \cdot \lambda \cdot 10^{-8}.$$

Так как $b_D < t$, то ширина щетки в это выражение не входит:

$$e_r = 2 \cdot 1 \cdot 10{,}2 \cdot 360 \cdot 30 \cdot 6{,}94 \cdot 10^{-6} = 1{,}53 \text{ V}.$$

г) Магнитная индукция под дополнительным полюсом. При $b_D < t$ можно написать

$$B_k' = \lambda \cdot AS = 6{,}94 \cdot 360 = 2\,500.$$

Для получения ускоренной коммутации следует увеличить полученное здесь значение магнитной индукции на величину

$$B_k = B_k' + \Delta B_k$$

и

$$\Delta B_k = \frac{\Delta U \cdot 10^6}{2w \cdot v \cdot l}.$$

Подставляя сюда

$$\Delta U = 1{,}0 \text{ V},$$

$$w = 1,$$

$$v = 10{,}2 \text{ m/sec},$$

$$l = 30 \text{ cm},$$

найдем

$$\Delta B_k = \frac{1 \cdot 10^6}{2 \cdot 1 \cdot 10{,}2 \cdot 30} = 1\,640;$$

$$B_k = B_k' + \Delta B_k = 2\,500 + 1\,640 = 4\,140.$$

20. Дополнительные полюса. а) Магнитная индукция в сечении дополнительного полюса.

$$b_k = b_d + 2\delta_k = 3{,}5 + 2 \cdot 1 = 5{,}5.$$

Воздушный зазор под дополнительными полюсами выберем такой же, как и воздушный зазор δ под главными полюсами: $\delta_k = 1{,}0$ cm.

Длину сердечника (в осевом направлении машины) возьмем меньше чем длину якоря:

$$l_k = 220.$$

Уменьшая длину l_k, мы должны в соответственной мере увеличить магнитную индукцию в воздушном промежутке под дополнительным полюсом (для того чтобы э. д. с., индуктированная в короткозамкнутой секции, осталась прежней):

$$B_k = \frac{l}{l_k} 4\,140 = \frac{32}{22} \cdot 4\,140 = 6\,020.$$

б) Найдем число ампервитков одного дополнительного полюса

$$AW_k = AW_a + AW_{\delta_k}.$$

Число ампервитков реакции якоря

$$AW_a = 0{,}5\tau \cdot AS = 0{,}5 \cdot 55 \cdot 360 = 9\,900.$$

Число ампервитков, необходимое для проведения магнитного потока дополнительного полюса через воздушный промежуток, будет

$$AW_{\delta_k} = 0{,}8 \cdot B_k \cdot \delta_k'.$$

$$\delta_k' = \delta_k \frac{t_1 + 10\delta_k}{Z_1 + 10\delta_k} = 1{,}0 \frac{3{,}66 + 10 \cdot 1{,}0}{2{,}66 \cdot 10 \cdot 1{,}0} = 1{,}14 \text{ cm}.$$

$$AW_{\delta_k} = 0{,}8 \cdot 6\,020 \cdot 1{,}14 = 5\,500.$$

Суммарное число ампервитков

$$AW_k = 9\,900 + 5\,500 = 15\,400.$$

Зная AW_k, можем найти число витков на одном дополнительном полюсе:

$$W_k = \frac{AW_k}{I_a} = \frac{15\,400}{1\,320} = 11{,}7.$$

Расположим на каждом дополнительном полюсе по 12 витков.

Сечение проводов обмотки дополнительных полюсов

$$q_k = \frac{I_a}{S}.$$

Задаемся

$$s = 3 \text{ A/mm}^2$$

и находим

$$q_k = \frac{1320}{3} = 440 \text{ mm}^2.$$

В качестве провода возьмем медную полосу сечения 17×26 mm.

Изгибая эту полосу на высокое ребро, получим жесткую спиральную катушку из 12 витков с воздушными промежутками между смежными витками в 6 mm.

в) Поток в сердечнике дополнительного полюса будет больше Φ_k на величину рассеянного потока. Обозначив через δ коэфициент магнитного рассеяния, найдем поток в сердечнике:

$$\Phi_k' = \sigma \cdot \Phi_k.$$

Поток Φ_k' меняется по высоте сердечника дополнительного полюса, так как силовые линии потока рассеяния замыкаются по всей высоте сердечника. В соответствии с этим магнитная индукция в разных сечениях сердечника имеет разную величину, уменьшаясь по мере приближения к воздушному промежутку.

Ввиду этого введем в расчет среднюю величину потока:

$$\Phi_{kc} = \frac{\Phi_k + \Phi_k'}{2} = \frac{\Phi_k + \sigma\Phi_k'}{2} = \Phi_k\left(\frac{1+\sigma}{2}\right).$$

Полагая приближенно $\sigma = 1{,}6$, найдем

$$\Phi_{kc} = \Phi_k\left(\frac{1+1{,}6}{2}\right) = 1{,}3\,\Phi_k = 0{,}89 \cdot 10^6.$$

Средняя величина магнитной индукции в сердечнике дополнительного полюса будет

$$B_{kc} = \frac{\Phi_{kc}}{\theta_k} = \frac{\Phi_{kc}}{l_k \cdot b_k'} = \frac{0{,}89 \cdot 10^6}{22 \cdot 6} = 6\,750.$$

В последней формуле $b_k' = 6$ cm – ширина полюсного сердечника дополнительного полюса и $l_k = 22$ cm — его длина в осевом направлении.

Полученная величина B_{kc} указывает на слабое магнитное насыщение дополнительного полюса.

Таким образом можно быть уверенным, что при изменении тока нагрузки машины будет соблюдаться приблизительная пропорциональность между током I_k и величиной B_k, что является необходимым условием хорошей коммутации.

21. **Эскиз машины.** Теперь мы имеем все данные, на основании которых можно набросать эскиз машины (фиг. 490). Имея последний и наметив приближенно средние вероятные пути силовых магнитных линий магнитной цепи, можем приступить к расчету необходимых ампервитков и построению магнитной характеристики машины.

22. **Характеристика холостого хода.** 1. Ампервитки на воздушный зазор. При холостом ходе $B_l = 8\,900$

$$AW_l = 1{,}6 k_1 \delta B_l = 1{,}6 \cdot 1{,}16 \cdot 1{,}0 \cdot 8\,900 = 16\,500 \text{ ампервитков.}$$

$$\left(\text{Здесь } k_1 = \frac{t_1 + 8\delta}{z_1 + 8\delta} = \frac{3{,}66 + 8 \cdot 1{,}0}{2{,}06 + 8 \cdot 1{,}0} = \frac{11{,}66}{10{,}06} = 1{,}16.\right)$$

2. Ампервитки на зубцы. Фиктивные величины магнитной индукции в зубцах будут

$$B_{z\min}=\frac{t_1 l_i B_l}{k_2 z_1 l}=\frac{36{,}6\cdot 30}{0{,}9\cdot 20{,}6\cdot 29}B_l=2{,}04\,B_l=2{,}04\cdot 8\,900=18\,200;$$

$$B_{z\,cp}=\frac{t\,l_i B_l}{k_2 z_m l}=\frac{36{,}6\cdot 30\cdot 8\,900}{0{,}9\cdot 19{,}3\cdot 29}=2{,}18\cdot 8\,900=19400;$$

$$B_{z\max}=\frac{t_1 l_i B_l}{k_2 z_2 l}=\frac{36{,}6\cdot 30\cdot 8\,900}{0{,}9\cdot 18\cdot 29}=2{,}34\cdot 8\,900=20800.$$

Действительная величина магнитной индукции $B_{z\partial}$ будет несколько меньше так как часть магнитного потока проходит по каналу; мы имеем

$$B_{zi}=B_{z\partial}+kH,$$

где

$$k=\frac{\text{сечение воздуха}}{\text{сечение железа}}=\frac{l_1 t-lk_2 z_1}{lk_2 z_1}=\frac{32\cdot 3{,}66-29\cdot 0{,}9\cdot 2{,}06}{29\cdot 0{,}9\cdot 2{,}06}=1{,}18.$$

Для определения $B_{z\partial}$ воспользуемся эмпирической формулой

$$H=\frac{B_{z\partial}-1\,900}{1{,}6}.$$

Подставляя ее в вышенаписанное уравнение для B_{zi}, получим

$$B_{zi}=B_{z\partial}+\frac{k(B_{z\partial}-19\,000)}{1{,}6};$$

$$B_{zi}=B_{z\partial}+0{,}74\;B_{z\partial}-14\,000,$$

откуда

$$B_{z\partial}=\frac{B_{zi}+14\,000}{0{,}74}=0{,}575\;B_{zi}+8\,050.$$

Находим действительные индукции:

$B_{z\partial_{\min}}=18\,200$ [1]	$aw_{z_{\min}}=120$
$B_{z\partial_{cp}}=0{,}575\cdot 19\,400+8\,050=19\,200$	$aw_{z_{cp}}=195$
$B_{z\partial_{\max}}=0{,}575\cdot 20\,800+8\,050=20\,000$	$aw_{z_{\max}}=300$

Общее число ампервитков на зубцы будет

$$AW_z=L_z\frac{aw_{\min}+4aw_{cp}+aw_{\max}}{6}=10\,\frac{120+4\cdot 195+300}{6}=2\,000.$$

3. Ампервитки на якорь. Индукция в якоре при холостом ходе

$$B_a=\frac{\Phi_a}{2k_2 lh}=\frac{10{,}3\cdot 10^6}{2\cdot 0{,}9\cdot 29\cdot 17}=11\,600.$$

$$aw_a=4{,}7;\;L_a=43\text{ cm}.$$

Общее число ампервитков на якорь

$$AW_a=aw_a L_a=4{,}7\cdot 43=202.$$

---

[1] Приведенная выше эмпирическая формула

$$B_{zi}=B_{z\partial}+\frac{k(B_{z\partial}-19\,000)}{1{,}6}$$

пригодна лишь для значений $B_{z\partial}>19\,000$.

Так как заметная разница между $B_{z\partial}$ и B_{zi} начинается лишь при значениях $>19\,000$, для наибольшего сечения зубца принято $B_{zi_{\min}}=B_{z\partial_{\min}}=18\,200$.

4. Ампервитки на сердечники магнитов. Индукция в сердечниках при холостом ходе

$$B_m = \frac{\sigma\Phi_a}{Q_m} = \frac{1{,}14\cdot 10{,}3\cdot 10^6}{690} = 17\,000.$$

Сердечники выполнены из листового железа:

$$aw_m = 60;\; L_m = 60 \text{ cm};$$
$$AW_m = aw_m L_m = 60\cdot 60 = 3\,600.$$

5. Ампервитки на ярмо (чугун). Индукция в ярме

$$B_j = \frac{\sigma\Phi_a}{2Q_j} = \frac{1{,}14\cdot 10{,}3\cdot 10^6}{2\cdot 730} = 8\,050;$$
$$aw_j = 50;\; L_j = 80;$$
$$AW_j = aw_j L_j = 50\cdot 80 = 4\,000.$$

Суммарное число ампервитков будет (на пару полюсов)

$$AW_0' = AW_l + AW_z + AW_a + AW_m + AW_j =$$
$$= 16\,500 + 2\,000 + 202 + 3\,600 + 4\,000 = 26\,302.$$

Полное число ампервитков на всех полюсах будет

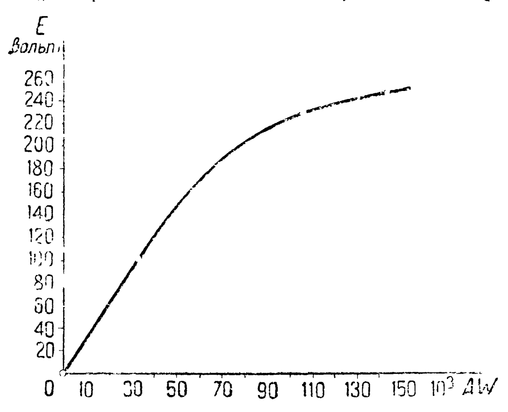
$$\sum AW_0' = AW_0 = pAW_0' = 4\cdot 26\,302 = 105\,200.$$

Для построения характеристики холостого хода подсчитываем ампервитки для нескольких значений E_a.

E_a	100	230	250	V
$\Phi_a = E_a\cdot 4{,}48\cdot 10^4$	4,48	10,3	11,2	$\times 10^6$
$B_l = \frac{\Phi_a}{1\,155}$	3 880	8 900	9 680	Gs
$B_a = \frac{\Phi_a}{756}$	5 020	11 600	12 600	„
$B_{zi\,cp}$	8 430	19 400	21 100	„
$B_{z\partial\,cp}$	8 430	19 200	20 180	„
$B_m = \frac{\sigma\Phi_a}{690}$	7 400	17 000	18 500	„
$B_j = \frac{\sigma\Phi_a}{1\,460}$	3 500	8 050	8 750	„
aw_a	1,0	4,7	9	AW/cm
aw_z	2	200	356	„
aw_m	1,7	60	140	„
aw_j	9,5	50	66	„
$AW_a = 43\,aw_a$	43	202	387	AW
$AW_z = 10\,aw_z$	20	2 000	3 560	„
$AW_l = 1{,}86\,B_l$	7 220	16 500	18 000	„
$AW_m = 60\,aw_m$	102	3 600	8 400	„
$AW_j = 89\,aw_j$	760	4 000	5 270	„
AW_0'	8 145	26 302	35 617	„
$AW_0 = pAW_0'$	32 600	105 200	142 500	„

На основании данных этой таблицы можно построить характеристику холостого хода нашей машины (фиг. 493).

23. Число ампервитков возбуждения при нагрузке. Благодаря наличности размагничивающих ампервитков AW_a (при смещенных щетках) и благодаря деформации кривой магнитной индукции в воздушном промежутке, влекущей за собой увеличение магнитного насыщения в некоторых частях магнитной цепи, происходит, как было выяснено выше, при нагрузке машины уменьшение магнитного потока.



Фиг. 493. Характеристика холостого хода.

Поэтому число необходимых ампервитков возбуждения при нагрузке AW, как было выяснено раньше, должно быть больше, чем число ампервитков холостого хода AW_0.

Ввиду того что наша машина имеет дополнительные полюса и щетки расположены все время в нейтральной зоне, можно принять $AW_a = 0$ и считаться только с уменьшением потока, вызванного деформацией магнитного поля. Влияние последнего можно приближенно учесть, увеличив число ампервитков холостого хода AW_0 в среднем на 10% и, следовательно, полагая

$$AW = 1{,}1 \cdot AW_0.$$

Таким образом мы имеем

$$AW = 1{,}1 \cdot 105\,200 \approx 116\,000.$$

24. Расчет сечения и числа витков обмотки возбуждения (фиг. 494). Восемь катушек возбуждения соединены последовательно. Сечение проволоки определяем по формуле

$$q_n = \frac{AWl_n\,(1+0{,}004\,T_m)}{5\,700\,U}\,1{,}1,$$

где l_n — средняя длина витков — определяется приблизительно по формуле

$$l_n = 2(l_m + 5) + 2(b_m + 5) = 2 \cdot 36 + 2 \cdot 29 = 130 \text{ cm}.$$

Сечение провода будет

$$q_n = \frac{AW \cdot l_n\,(1 + 0{,}004\,T_m)}{5\,700\,U}\,1{,}1 =$$

$$= \frac{116\,000 \cdot 130\,(1 + 0{,}004\,50)}{5\,700 \cdot 230}\,1{,}1 = 15{,}1 \text{ mm}^2.$$

Берем квадратное сечение $\dfrac{3{,}9 \times 3{,}9}{4{,}5 \times 4{,}5 \text{ mm}^2}$.

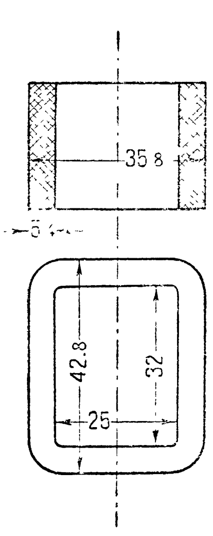
Выбираем плотность тока $s_n = 1{,}4$ A/mm^2.

Ток возбуждения при полной нагрузке

$$i_n = q_n s_n = 15{,}1 \cdot 1{,}4 \approx 21{,}1 \text{ A}.$$

Общее число витков

$$w_n = \frac{AW}{i_n} = \frac{115\,720}{21{,}1} \approx 5\,500.$$



Фиг. 494. Катушка электромагнита.

На каждый полюс приходится

$$\frac{5\,500}{8} \approx 688 \text{ витков}.$$

Данные катушки, сидящей на одном полюсе:

Число витков в слое 57
„ слоев 12
„ витков в катушке 684
Высота обмотки $h_w = 57 \cdot 4{,}5 = 25{,}6$ cm.
Ширина „ $b_w = 12 \cdot 4{,}5 = 5{,}4$ cm.

Таким образом окончательно полное число витков обмотки возбуждения будет

$$684 \cdot 8 = 5\,470.$$

Сопротивление шунтовой обмотки будет

$$R_n = \frac{w_n l_n (1 + 0{,}004\, T_m)}{5\,700\, q_n} = \frac{5\,470 \cdot 130 \cdot 1{,}2}{5\,700 \cdot 15{,}2} \approx 9{,}85\ \Omega$$

(в горячем состоянии).

Максимальный ток возбуждения

$$i_{n\,\max} = \frac{230}{9{,}85} = 23{,}4\ \text{A}.$$

Ток возбуждения при холостом ходе должен быть

$$i_{n0} = \frac{AW_0}{w_n} = \frac{105\,200}{5\,470} = 19{,}2\ \text{A}.$$

Для того чтобы по шунтовой обмотке протекал такой ток i_{n0}, необходимо, чтобы сопротивление шунтовой цепи при этом было

$$r_{n0} = \frac{U}{i_{n0}} = \frac{230}{19{,}2} \approx 12\ \Omega;$$

отсюда получаем сопротивление шунтового реостата

$$R_n = 12 - 9{,}85 = 2{,}15\ \Omega.$$

25. Потери и нагревание якоря. Потери железа. Число периодов перемагничивания

$$f = \frac{pn}{60} = \frac{4 \cdot 140}{60} = 9{,}3.$$

Объем железа якоря без зубцов

$$V_a = (D_a^2 - D_b^2)\,\frac{\pi}{4}\, lk_2 = (13^2 - 9{,}6^2)\,\frac{\pi}{4}\, 2{,}9 \cdot 0{,}9 = 158\ \text{dm}^3;$$

вес его

$$Q_a = 7{,}8 V_a = 7{,}8 \cdot 158 = 1\,230\ \text{kg}.$$

Объем железа зубцов

$$V_z = Zz_m \frac{1}{2}\, L_z l k_2 = 120 \cdot 0{,}193 \cdot 0{,}5 \cdot 2{,}9 \cdot 0{,}9 = 30{,}2\ \text{dm}^3;$$

вес его

$$Q_z = 7{,}8 V_z = 7{,}8 \cdot 30{,}2 = 236\ \text{kg}.$$

Потери на гистерезис в якоре

$$P_{ha} = \varepsilon \frac{f}{100} \left(\frac{B_a}{10\,000}\right)^2 [Q_a]\ 2{,}0 = 4{,}4\ \frac{9{,}3}{100} \left(\frac{12\,200}{10\,000}\right)^2 [1\,230]\ 2{,}0 = 1\,450\ \text{W}.^1$$

Потери на гистерезис в зубцах

$$P_{hz} = \varepsilon \frac{f}{100} \left(\frac{B_{zm}}{10\,000}\right)^2 [Q_z]\ 2{,}0 = 4{,}4\ \frac{9{,}3}{100} \left(\frac{20\,200}{10\,000}\right)^2 [236] \cdot 2{,}0 = 785\ \text{W}.^1$$

---

[1] Числовые значения коэфициентов ε и σ соответствуют обыкновенному динамному железу толщиной $\Delta = 0{,}5$ mm (глава двадцать четвертая).

Потери на вихревые токи в якоре

$$P_{fa} = \sigma \left(\frac{f}{100}\right)^2 \left(\frac{B_a}{10\,000}\right)^2 [Q_a]\ 2{,}0 = 5{,}6 \left(\frac{9{,}3}{100}\right)^2 \left(\frac{12\,000}{10\,000}\right)^2 [1\,230]\ 2{,}0 = 171\ \text{W}$$

Потери на вихревые токи в зубцах

$$P_{fz} = \sigma \left(\frac{f}{100}\right)^2 \left(\frac{B_{zm}}{10\,000}\right)^2 [Q_z]\ 2{,}0 \doteq 5{,}6 \left(\frac{9{,}3}{100}\right)^2 \left(\frac{20\,000}{10\,000}\right)^2 [236]\cdot 2{,}0 = 92\ \text{W}.$$

Общие потери в железе

$$P_{ha} + P_{hz} + P_{fa} + P_{fz} = 1\,450 + 785 + 171 + 92 = 2\,498\ \text{W}.$$

Джоулевы потери в обмотке якоря. Длина полувитка обмотки якоря

$$l_a = l_1 + 1{,}4\tau + 5\ \text{cm} = 32 + 1{,}4\cdot 55 + 5 = 114\ \text{cm}.$$

Сопротивление якоря

$$R_a = \frac{N}{(2a)^2}\cdot\frac{l_a(1+0{,}004\,T_a)}{5\,700 q_a} = \frac{960}{(2\cdot 4)^2}\cdot\frac{114\,(1+0{,}004\cdot 40)}{5\,700\cdot 54} = 0{,}0064\ \Omega.$$

Потеря напряжения в якоре

$$I\cdot R_a = 1\,320\cdot 0{,}0064 = 8{,}4\ \text{V}.$$

Потеря энергии в меди якоря

$$P_{ka} = I_a^2 R_a = 1\,320^2\cdot 0{,}0064 = 11\,100\ \text{W};\ P_{kz} = \frac{l_1}{l_a} P_{ka} = \frac{32}{114}\ 11\,100 = 3\,120\ \text{W}.$$

Поверхность охлаждения якоря

$$A_a = \pi D l_1 = \pi\cdot 140\cdot 32 = 14\,070\ \text{cm}^2.$$

Удельная поверхность охлаждения

$$a_a = \frac{A_a}{P_{ka} + P_{hz} + P_{fz}}(1 + 0{,}1\,v) = \frac{14\,070\ \text{cm}^2}{3\,120 + 171 + 92}(1 + 0{,}1\cdot 10{,}2) =$$

$$= \frac{14\,070}{3\,383}\ 2{,}02 = 8{,}4\ \text{cm}^2/\text{W}.$$

Повышение температуры

$$T_a = \frac{350}{a_a} = \frac{350}{8{,}4} = 42°.$$

26. Потери и нагрев коллектора. Джоулевы потери

$$P_k' = 2\,I\,\Delta e.$$

Для щеток средней твердости берем

$$\Delta e = 1{,}0\ \text{V}.$$

$$P_k' = 2\cdot 1\,320\cdot 1{,}0 = 2\,640\ \text{W}.$$

Потери трения на коллекторе:

$P_r = 9{,}81\ p F_b k_0 v_k$;

p — давление щеток на коллектор, равное 0,12 kg/cm²;

k_0 — коэфициент трения, равный 0,25;

$F_b = 8\cdot 54$ cm $= 432$ cm²;

$v_k = 7{,}6$ m/sec;

$P_r = 9{,}81\cdot 0{,}12\cdot 432\cdot 0{,}25\cdot 7{,}6 = 965$ W.

Удельная поверхность охлаждения коллектора

$$a_k = \frac{\pi D_k l_k}{P_k + P_2}(1 + 0{,}1\ v_k) = \frac{\pi\cdot 104\cdot 33}{2\,640 + 965}(1 + 0{,}1\cdot 7{,}6) =$$

$$= \frac{\pi\cdot 104\cdot 33}{3\,605}\ 1{,}76 = 5{,}3\ \text{cm}^2/\text{W}.$$

Повышение температуры

$$T_k = \frac{100 \div 150}{a_k} = \frac{120}{5,3} = 23°.$$

27. Потери и нагрев обмотки дополнительных полюсов. Длина витка обмотки дополнительного полюса

$$l_d = (20 + 2)\,2 + (6 + 2)\,2 = 44 + 16 = 60 \text{ cm}.$$

Сопротивление обмотки дополнительных полюсов

$$R_d = 8\,\frac{l_d w_k (1 + 0,004\,T_d)}{5\,700\,q_d} = \frac{8\cdot 60\cdot 12\,(1 + 0,004\cdot 40)}{5\,700\cdot 450} = 0,0022\ \Omega.$$

Потери энергии в обмотке

$$P_d = 1\,320^2\cdot 0,0022 = 3\,830 \text{ W}.$$

Поверхность охлаждения одной катушки

$$A_d' = [(20 + 4)\,2 + (6 + 4)\,2]\,26 + (24\cdot 10 - 20\cdot 6) = 1\,890 \text{ cm}^2$$

(высота катушки $h_d = 26$ cm).

Поверхность охлаждения всех восьми катушек

$$A_d = 8\cdot 1\,890 = 15\,120.$$

Удельная поверхность охлаждения

$$a_d = \frac{A_d}{P_d} = \frac{15\,120}{3\,830} = 3,94 \text{ cm}^2/\text{W}.$$

Повышение температуры

$$T_d = \frac{C_d}{a_d} = \frac{225}{3,94} = 57°.$$

28. Потери и нагрев обмотки возбуждения при полной нагрузке.

$$P_n = i_n^2 R_n = 21,1^2\cdot 9,85 = 4\,380 \text{ W}.$$

Поверхность охлаждения

$$A_m' = [(31 + 10,8)\,2 + (24 + 10,8)\,2]\,25,6 + (31 + 10,8)\cdot(24 + 10,8) - 31\cdot 24 = 4\,630 \text{ cm}^2.$$

Поверхность охлаждения восьми катушек

$$A_m = 8\cdot 4\,630 = 37\,000 \text{ cm}^2.$$

Удельная поверхность охлаждения

$$a_m = \frac{A_m}{P_n} = \frac{37\,000}{4\,380} \approx 8,45 \text{ cm}^2/\text{W}$$

Повышение температуры

$$T_m = \frac{450}{a_m} = \frac{450}{8,45} = 53°.$$

29. Потери на трение в подшипниках и трение о воздух. Потери на трение в подшипниках и трение о воздух принимаем в 1%:

$$P_R = 300\,000\cdot 0,01 = 3\,000 \text{ W}.$$

30. Определение к. п. д. при полной нагрузке

$$P_v = P_k + P_h + P_f + P_\rho.$$

$$P_k = P_{ka} + P_k' + P_d + P_n = 11\,100 + 2\,640 + 3\,830 + 4\,380 = 21\,950 \text{ W}$$
$$P_h = P_{ha} + P_{hz} = 1\,450 + 785 \;.\;.\;.\;.\;.\;.\;.\;.\;.\;.\;.\;.\;. = 2\,235 \;"$$
$$P_f = P_{fa} + P_{fz} = 171 + 92 \;.\;.\;.\;.\;.\;.\;.\;.\;.\;.\;.\;.\;.\;.\;.\;.\;. = 263 \;"$$
$$P_\rho = 3\,000 + 965 \;. = 3\,965 \;"$$

Итого . . . 28 413 W

$$P_v \approx 28\,413.$$

Коэфициент полезного действия при полной нагрузке

$$\eta = \frac{P}{P + P_v} = \frac{300}{300 + 28{,}4} \approx 91{,}5\%.$$

Коэфициент полезного действия при половинной нагрузке. При половинной нагрузке потери

$$P_n,\ P_{hf},\ P_\rho$$

остаются приблизительно теми же; P_{ka} и P_d уменьшаются в отношении квадрата силы тока, а P_k — в отношении первой степени (последнее потому, что сопротивление контакта уменьшается с увеличением тока, так что при больших плотностях тока $\Delta e \approx \text{const}$).

$$P_k = \frac{P_{ka} + P_d}{4} + \frac{P_k'}{2} = \frac{11\,100 + 3\,830}{4} + \frac{2\,640}{2} = 3\,730 + 1\,320 = 5\,050 \text{ W},$$

$$P_v = 5\,050 + P_n + P_{hf} + P_\rho = 5\,050 + 2\,235 + 263 + 3\,965 + 4\,380 = 15\,893 \text{ W}.$$

$$\eta_{1/2} = \frac{P}{P + P_v} = \frac{150}{150 + 15{,}9} = 90{,}5\%.$$

ИМЕННОЙ УКАЗАТЕЛЬ

ПРЕДМЕТНЫЙ УКАЗАТЕЛЬ

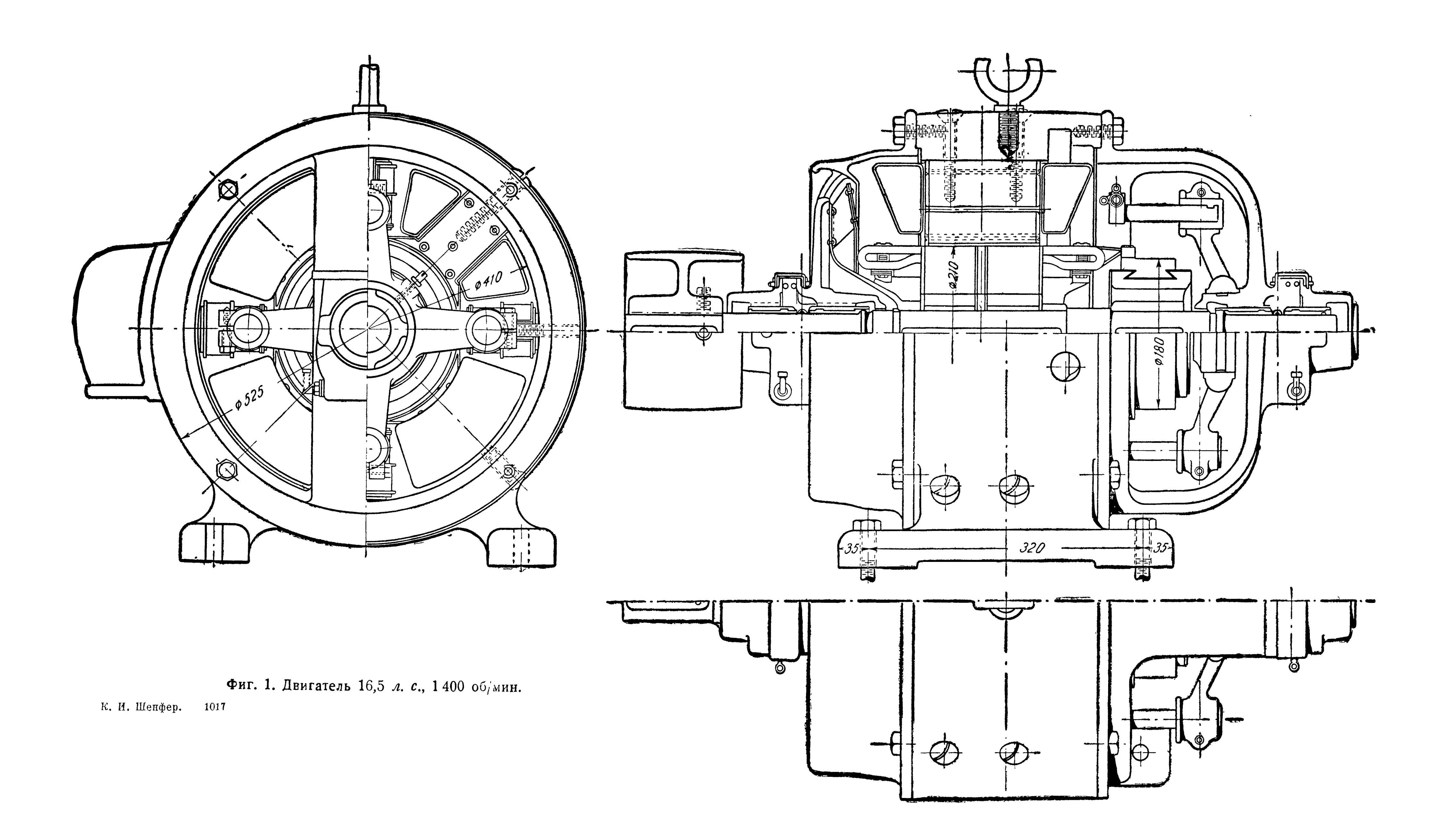
---

*

Рецензент проф. *М. П. Костенко.*
Редактор инж. *В. И. Тимохина.*
Технический редактор *К. М. Шевелев.*
Корректор *А. С. Бакулова.*

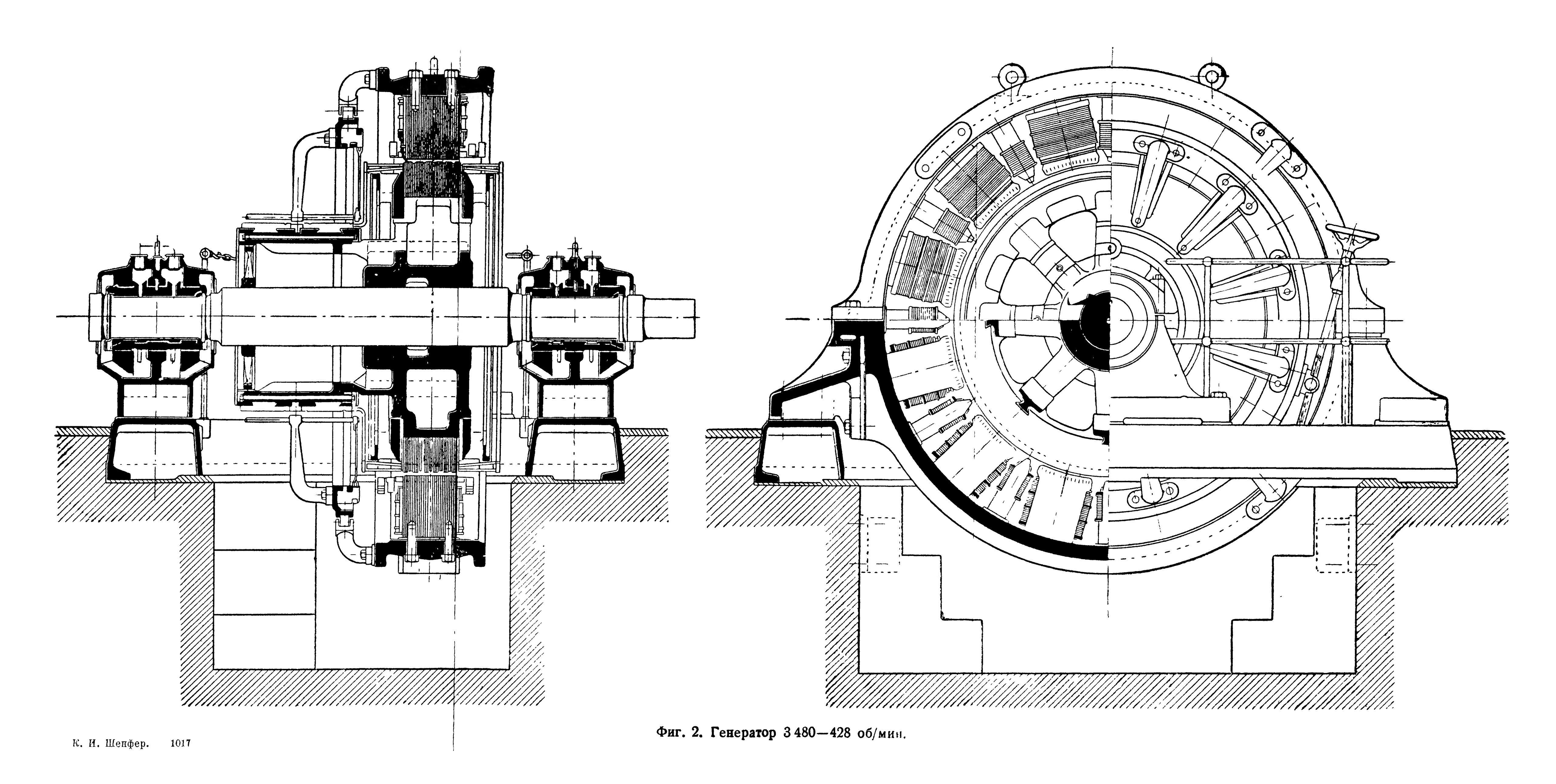
Сдано в производство 21/IV-37 г.
Подписано к печати 26/VIII-37 г.
Формат бум. 62 × 94$^{1}/_{16}$.
Колич. печ. листов 27,25 + 2 вклейки
Количество бум. листов 13,75
Учетно-авт. лист. 36.
Колич. печ. знак. в 1 бум. листе 101.000
Авторских листов 33.
Энергоредакция № 31.
Заказ № 1017.
Тираж 10000. Учетный номер 7464.
Уполном. Главлита Б-20633.

3-я тип. ОНТИ. Ленинград, ул. Моисеенко, 10.

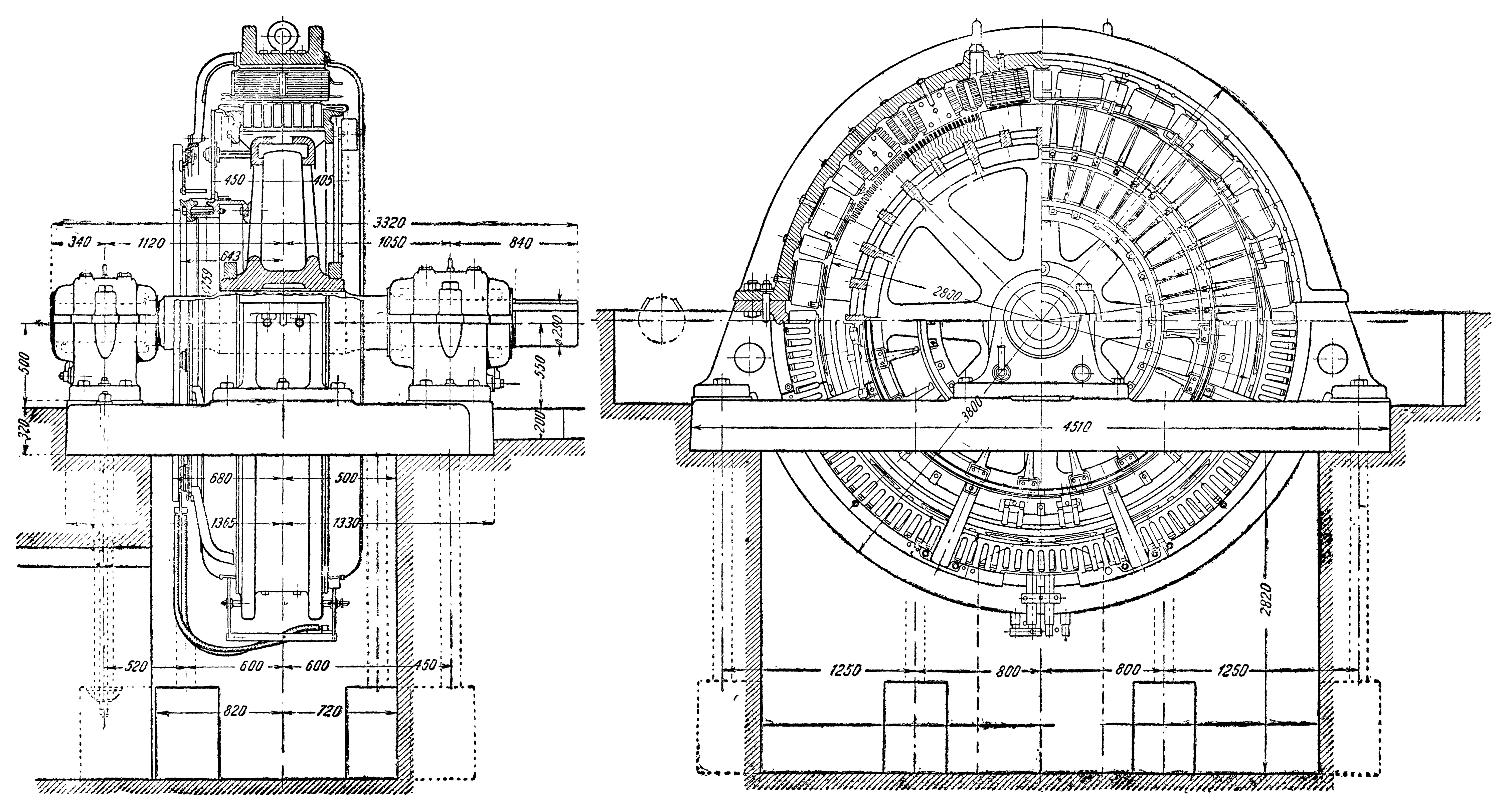


Фиг. 1. Двигатель 16,5 *л. с.*, 1 400 об/мин.

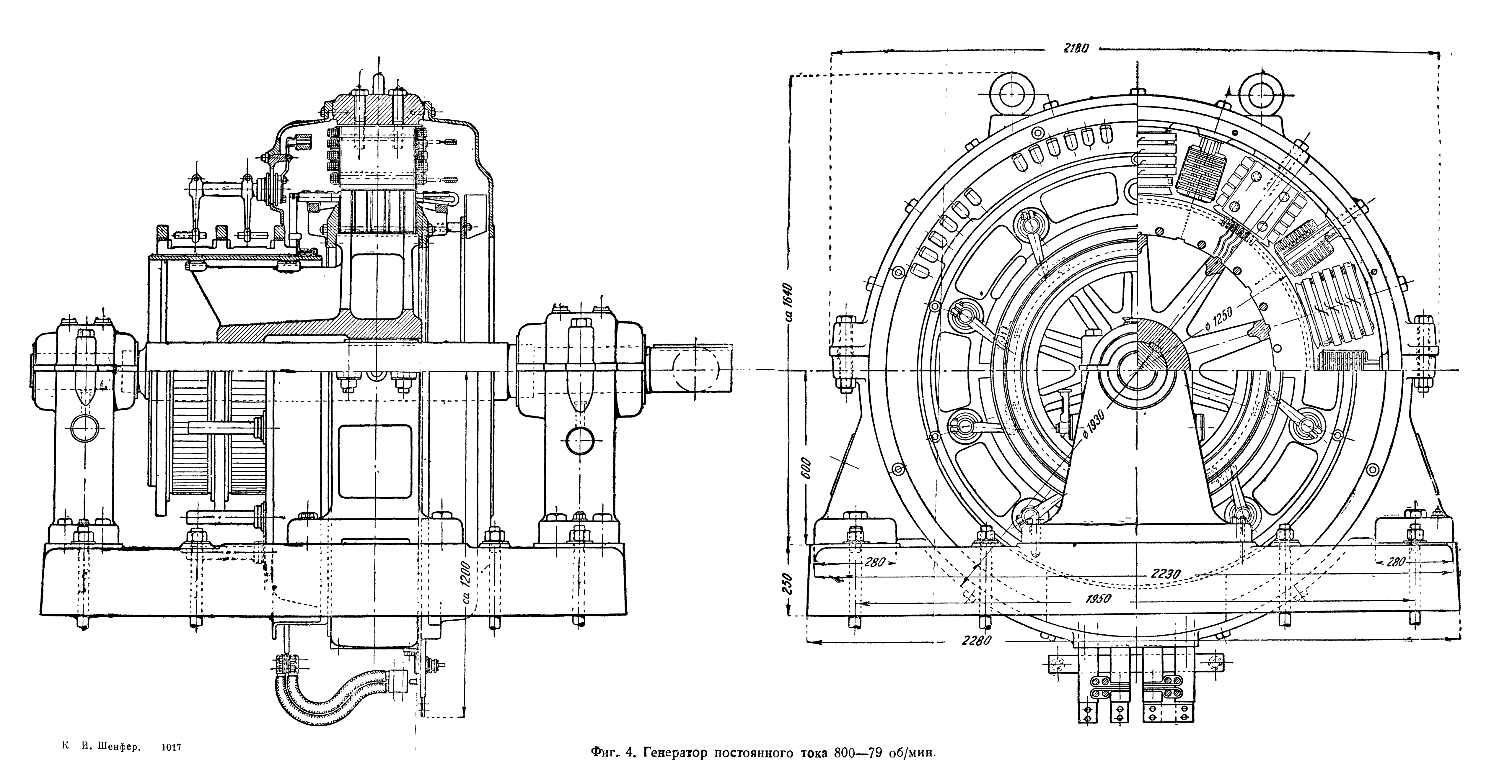
К. И. Шепфер. 1017



Фиг. 2. Генератор 3 480—428 об/мин.



Фиг. 3. Генератор 200—180 об/мин.



К И. Шенфер. 1017

Фиг. 4. Генератор постоянного тока 800—79 об/мин.